3-3 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(2月13日) M7.3 GNSS]

第1~6図は、2021年2月13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.固定局は大潟観測点 (新潟県)である.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,小高観測点で西に約2cm等,福島県の太平洋岸で地殻変動が観測された.

[福島県沖の地震 SAR 干渉解析結果]

第2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 ルを超える変動は見られない.

[福島県沖の地震 震源断層モデル]

第3~6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(マルコフ連鎖モンテカルロ)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、断層の長さに対する幅の比を 1/2 に固定し、Strasser et al. (2010)に よる地震規模と断層面積に関する経験的スケーリング則に近づくよう拘束を加えた.

第3図は,計算の結果,北東-南西走向で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,震源分布と整合しており,断層面の上端は深さ約38kmに位置する.モーメントマグニチュードは7.1(剛性率75GPaを仮定)となった.

第4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.

第5図は、北北東-南南西走向で西北西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 たもう一つの震源断層モデルである。第3図と同様に、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、第5図の断層モデル推定についてのコーナープロットである.

[宮城県沖の地震(3月20日) M6.9 GNSS]

第7~12 図は、2021 年 3 月 20 日に発生した宮城県沖の地震の地殻変動に関する資料である.

第7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.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,南方観測

点で東南東に約 2cm 等, 宮城県を中心に広い範囲で地殻変動が観測された.

第8図上段は, GNSS連続観測結果による上下変動ベクトル図である.固定局は大潟観測点(新潟県)である.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,河北観測点で約2cmの沈降, M牡鹿観測点で約1cmの隆起等,宮城県北部を中心に地殻変動が観測された.

[宮城県沖の地震(3月20日) すべり分布図]

第 9~10 図は、電子基準点で得られた地殻変動に基づき、プレート境界面を 5km×5km の小断層 に分割して推定したすべり分布モデルに関する資料である.推定においては、すべりの空間分布に ラプラシアン平滑化を適用し、そのハイパーパラメータは ABIC (赤池ベイズ情報量基準)を用いて 決定した.地震の震央を中心としてすべりが分布し、モーメントマグニチュードは 7.2 (剛性率 60GPa を仮定)となった.地震に伴う地殻変動について、観測値とすべりモデルからの計算値を、それぞれ 黒色と赤色のベクトルで表現することとし、第9 図には水平成分、第 10 図には上下成分を示す.

[宮城県沖の地震(3月20日)震源断層モデル]

第11~12 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, Strasser et al. (2010)による地震規模と断層面積に関する経験的スケーリング則に近づくよう拘束を 加えた.

第 11 図は,計算の結果,北北東-南南西走向で西北西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,震源分布と整合してお り,断層面の上端は深さ約 40km に位置する.モーメントマグニチュードは 7.1 (剛性率 60GPa を仮 定)となった.

第12回は、コーナープロットである. 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.

[宮城県沖の地震(5月1日) M6.8 GNSS]

第13~20図は、2021年5月1日に発生した宮城県沖の地震の地殻変動に関する資料である.

第13 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.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,S石巻 牧浜観測点で東南東に約1 cm等,宮城県を中心に広い範囲で地殻変動が観測された.

第14 図上段は,GNSS 連続観測結果による上下変動ベクトル図である。固定局は大潟観測点(新 潟県)である。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,女川観 測点で約1cmの沈降等,牡鹿半島周辺で地殻変動が観測された。

[宮城県沖の地震(5月1日) すべり分布図]

第15~16 図は、電子基準点で得られた地殻変動に基づき、プレート境界面を 5km×5km の小断層 に分割して推定したすべり分布モデルに関する資料である.推定においては、2021 年 3 月 20 日の 地震の場合(第 9~10 図)と同一の解析条件を用いた.本震から北側に広がる余震の分布と整合す る場所にすべりが分布し、モーメントマグニチュードは 7.0 (剛性率 60GPa を仮定)となった.地震 に伴う地殻変動について、観測値とすべりモデルからの計算値を、それぞれ黒色と赤色のベクトル で表現することとし、第 15 図には水平成分、第 16 図には上下成分を示す.

第17~18 図は, 推定したすべり分布モデルについて, 2005 年 8 月 16 日及び 2021 年 3 月 20 日に 発生した宮城県沖の地震の場合と比較する資料である. 推定においては, いずれも同一の解析条件 を適用した.また,同一の凡例を用いてすべり量と地殻変動量を表し,地殻変動については第17 図 に水平成分,第18 図に上下成分を示す. 2005 年 8 月 16 日の地震については震央から西側に広がる 余震の分布と整合する場所にすべりが分布している.それらすべり域に比べると, 2021 年 3 月 20 日 と5月1日に発生した地震のすべりの中心は,陸よりに推定されている.

[宮城県沖の地震(5月1日) 震源断層モデル]

第 19~20 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, 断層の長さに対する幅の比を Strasser et al. (2010)による経験的スケーリング則で固定し,Strasser et al. (2010)による地震規模と断層面積に関する経験的スケーリング則に近づくよう拘束を加えた.

第 19 図は,計算の結果,北東-南西走向で北西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,震源分布と整合しており,断 層面の上端は深さ約 41km に位置する.モーメントマグニチュードは 6.9 (剛性率 60GPa を仮定)と なった.

第20図下段は、コーナープロットである.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.

[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21~25 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21~23 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21 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157cm で ある.

第22~23 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牡鹿観測点の約 69cm の隆起のうちの約 5cm と約1cm は,それぞれ 2011 年 4 月 7 日と 2021 年 3 月 20 日の宮城県沖の地震によるものである.

第24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. 宮城県周辺には、2021年3月20日に発生した宮城県沖の地震に伴う地殻変動が重畳していると考えられる. この期間における岩手川崎A観 測点の変動量は2.8cmとなっている. また、余効変動のほか、2021年2月13日の福島県沖の地震に 伴う地殻変動が見られる.

第25図に最近3か月間の上下変動を示す.2021年3月20日に発生した宮城県沖の地震に伴い, 宮城県北部を中心とした小さな沈降と牡鹿半島で小さな隆起が見られる.

[GNSS 連続観測 東北地方太平洋沖地震後]

第26~31 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26 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 27 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27~31 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26 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27~29 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 29 図下段から第 31 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32~37 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32図の三隅-宮古基線及び第33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34図の三隅-矢本基線及び第37図の三隅-皆瀬基線の東西成分の速度に2021年初頭に見られる一時的な変化は、2021年3月20日に発生した宮城県沖の地震によるものである.

第35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36回に示される三隅-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38~40 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.

今回から,GEONETの最終解をF3 解からF5 解に変更した.F5 解では,対流圏遅延の推定手法の 変更に伴って上下成分のばらつきが一般に減少しており,上下方向の水平勾配の推定において,標 準偏差に対する勾配推定値の比が改善する傾向が見られる.しかし,水平方向に比べると,上下方 向の変位速度は大きな標準偏差を持ち,水平勾配の計算に用いられる帯状領域内の観測点数が少な いところでは,プレート収束方向における空間分布の範囲も狭くなっており,推定結果が不安定に なることがある.

第 38 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39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40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38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38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.



第1図 福島県沖の地震(2021年2月13日, M7.3)に伴う地殻変動: (上図)水平変動, (下図)3成分時系列グラフ

Fig. 1 Crustal deformation associated with the M7.3 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on February 13, 2021: horizontal displacement (upper) and 3 components time series (lower).

福島県沖の地震(2月13日 M7.3) 「だいち2号」による SAR 干渉解析結果



2018 年 11 月 11 日~2021 年 2 月 14 日 22:49 衛星進行方向 北行、電波照射方向 左、入射角39.8° ×: 震央2021/02/13 23:07 深さ 約 55km M7.3 (気象庁一元化震源)

2018 年 11 月から 2021 年 2 月までの長期間の地殻変動(2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動を含む)は電子 基準点での観測値を用いて除去しています。また、今回の結果は速報であり、より詳細な分析等により、今後内容 が更新されることがあります。

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す。

第2図 福島県沖の地震(2021年2月13日, M7.3) SAR 干渉解析結果

Fig. 2 Synthetic Aperture Rader (SAR) interferograms result of the M7.3 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on February 13, 2021.

2021 年 2 月 13 日福島県沖の地震の震源断層モデル

基準期間:2021/02/06 09:00:00~2021/02/13 08:59:59[F5:最終解]JST 比較期間:2021/02/15 09:00:00~2021/02/22 08:59:59[F5:最終解]JST 固定局:大潟(950241)



図1 南東傾斜で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。
- (下)傾斜方向(A-B)に射影した断層面(太線)及び震源分布(点)。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、点は本震発生(2/13 23:07)から 2/17 0時までに発生した震源(気象庁一元化震源を使用)。

表1 推定された震源断層モデルパラメータ

経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	M		
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	IVIW		
141.248	37.492	38.2	51.9	26.0	34.3	40.0	95.9	0.58	7.10		
(0.062)	(0.050)	(5.5)	(5.9)	(3.0)	(3.0)	(4.5)	(8.8)	(0.11)	(0.04)		
· 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_wと断層面積がスケーリング則(Strasser et al. 2010)に近づくよう拘束

断層長さに対する断層幅の比を 1/2 に固定

Mwの計算においては、剛性率を75 GPaと仮定

第3図 福島県沖の地震(2021年2月13日, M7.3)の震源断層モデル

Fig. 3 Rectangular fault model of the M7.3 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on February 13, 2021.



【参考】事後確率分布(コーナープロット)

図2:モデルパラメータのコーナープロット 各パラメータ(経度、緯度、深さ、長さ、幅、走向角、傾斜角、すべり角、すべり量)間の 相関関係を表す。

第4図 福島県沖の地震(2021 年 2 月 13 日, M7.3)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. 4 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.3.

【参考】西北西傾斜で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。
- (下)傾斜方向(A-B)に射影した断層面(太線)及び震源分布(点)。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、点は本震発生(2/13 23:07)から 2/17 0時までに発生した震源(気象庁一元化震源を使用)。

ス~ IEEC107に展跡間間 ビブルバング ノ	表 2	推定された震源断層モデルパラメータ
--------------------------	-----	-------------------

経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	NA		
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	IVIW		
141.676	37.797	35.1	50.0	25.0	207.3	50.7	85.1	0.60	7.09		
(0.088)	(0.056)	(6.5)	(5.5)	(2.8)	(9.4)	(4.4)	(6.7)	(0.11)	(0.05)		
· 7	· 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_wと断層面積がスケーリング則 (Strasser et al. 2010) に近づくよう拘束

- ・ 断層長さに対する断層幅の比を 1/2 に固定
- M_wの計算においては、剛性率を75 GPaと仮定

第5図 福島県沖の地震(2021年2月13日, M7.3)の震源断層モデル(参考:西北西傾斜)

Fig. 5 Rectangular fault model of the M7.3 earthquake off the coast of Fukushima Prefecture on February 13, 2021 (for reference; assuming west-northwest dipping fault).



【参考】事後確率分布(コーナープロット)

図4:モデルパラメータのコーナープロット 各パラメータ(経度、緯度、深さ、長さ、幅、走向角、傾斜角、すべり角、すべり量)間の 相関関係を表す。

- 第6図 福島県沖の地震(2021年2月13日, M7.3)の震源断層モデル(参考:西北西傾斜) モデルパラメータのコーナープロット
- Fig. 6 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.5.



第7図 宮城県沖の地震(2021年3月20日, M6.9)に伴う地殻変動: (上図)水平変動, (下図)3成分時系列グラフ

Fig. 7 Crustal deformation associated with the M6.9 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on March 20, 2021: horizontal displacement (upper) and 3 components time series (lower).



宮城県沖の地震(3月20日 M6.9)前後の観測データ

第8図 宮城県沖の地震(2021年3月20日, M6.9)に伴う地殻変動: (上図)上下変動, (下図)3成分時系列グラフ

Fig. 8 Crustal deformation associated with the M6.9 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on March 20, 2021: vertical displacement (upper) and 3 components time series (lower).



2021 年 3 月 20 日宮城県沖の地震のすべり分布

等値線は 1978 年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は 2005 年 8 月 16 日 宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面はKita et al. (2010, EPSL)およびNakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- ・ ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- M_wの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定
- ・ ☆印は震央、青丸は本震発生(3/20 18:09)から 3/21 11 時までに発生した震源を表す (気象庁一元化震源を使用)

第9図 宮城県沖の地震(2021年3月20日, M6.9) すべり分布と地殻変動(水平)

Fig. 9 Slip distribution on the plate interface and horizontal deformation of the M6.9 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on March 20, 2021.



等値線は 1978 年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は 2005 年 8 月 16 日 宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面はKita et al. (2010, EPSL)および Nakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- · ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- ・ Mwの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定
- ・ ☆印は震央、青丸は本震発生(3/20 18:09)から 3/21 11 時までに発生した震源を表す(気象庁一元 化震源を使用)
- 第10図 宮城県沖の地震(2021年3月20日, M6.9) すべり分布と地殻変動(上下)
- Fig. 10 Slip distribution on the plate interface and vertical deformation of the M6.9 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on March 20, 2021.



2021 年 3 月 20 日宮城県沖の地震の震源断層モデル

基準期間:2021/02/13 09:00:00~2021/03/20 08:59:59[F5:最終解]JST 比較期間:2021/03/22 09:00:00~2021/03/29 08:59:59[F5:最終解]JST 固定局:大潟(950241)

図1 西北西傾斜で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。等値線は1978年宮城県沖地震のすべり分布(Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は2005年8月16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)。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、点は本震発生(3/20 18:09)から 3/26 0時までに発生した震源(気象庁一元化震源を使用)。

表 1	推定された震源断層モデルパラメ-	ータ
-----	------------------	----

	経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量 [m]	Mw	
	[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]			
	142.058	38.510	40.1	37.4	42.2	194.9	24.2	84.8	0.70	7.13	
_	(0.049)	(0.052)	(3.3)	(9.0)	(7.2)	(12.4)	(3.0)	(13.6)	(0.13)	(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 _w と断層面積がスケーリング則(Strasser et al. 2010)に近づくよう拘束										
	・断	i層長さと断	「層幅の比を打	句束しない	で計算し†	た。					
	. м	の計算にも	いてけ 回帰	H							

M_wの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定

第11図 宮城県沖の地震 (2021年3月20日, M6.9)の震源断層モデル

Fig. 11 Rectangular fault model of the M6.9 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on March 20, 2021.



【参考】事後確率分布(コーナープロット)

図2:モデルパラメータのコーナープロット 各パラメータ(経度、緯度、深さ、長さ、幅、走向角、傾斜角、すべり角、すべり量)間の 相関関係を表す。

第 12 図 宮城県沖の地震(2021 年 3 月 20 日, M6.9)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. 12 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.11.



宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ(暫定)

この地震に伴い小さな地殻変動が観測された.

第13図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8)に伴う地殻変動: (上図)水平変動, (下図)3成分時系列グラフ

Fig. 13 Crustal deformation associated with the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021: horizontal displacement (upper) and 3 components time series (lower).



宮城県沖の地震(5月1日 M6.8)前後の観測データ(暫定)

この地震に伴い小さな地殻変動が観測された.

第14図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8)に伴う地殻変動: (上図)上下変動, (下図)3成分時系列グラフ

Fig. 14 Crustal deformation associated with the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021: vertical displacement (upper) and 3 components time series (lower).



2021年5月1日宮城県沖の地震のすべり分布(暫定)

等値線は 1978 年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は 2005 年 8 月 16 日 宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。

- · プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面はKita et al. (2010, EPSL)およびNakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- M_wの計算においては、剛性率を60 GPaと仮定
- ・ ☆印は震央、青丸は本震発生(5/1 10:27)から 5/1 24 時までに発生した震源を示す(気象庁ー元化 震源を使用)

第15図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8) すべり分布と地殻変動(水平)(暫定)

Fig. 15 Slip distribution on the plate interface and horizontal deformation of the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021 (preliminary results).



等値線は 1978 年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は 2005 年 8 月 16 日 宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面は Kita et al. (2010, EPSL)および Nakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- ・ ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- ・ M_wの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定
- ・ ☆印は震央、青丸は本震発生(5/1 10:27)から 5/1 24時までに発生した震源を示す(気象庁一元化 震源を使用)

第16図 宮城県沖の地震 (2021年5月1日, M6.8) すべり分布と地殻変動(上下)(暫定)

Fig. 16 Slip distribution on the plate interface and vertical deformation of the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021 (preliminary results).



(参考) 2005 年 8 月 16 日 及び 2021 年 3 月 20 日 宮城県沖の地震のすべり分布との比較

等値線は 1978 年宮城県沖地震のすべり分布(Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は 2005 年 8 月 16 日宮城県沖の地震の震源断層モデル(国土地理院)。

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面は Kita et al. (2010, EPSL)および Nakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- · ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- M_wの計算においては、剛性率を 60 GPa と仮定
- ☆印は震央、青丸は余震の震源(左図:本震発生(8/16 11:46)から8/16 24時まで、中図:本震発生(3/20 18:09)から3/21 11時まで、右図:本震発生(5/1 10:27)から5/1 24時まで)を表す(気象庁一元化震源を使用)

第17図 宮城県沖の地震のすべり分布と地殻変動(水平)の比較

Fig. 17 Comparison of slip distribution and horizontal deformation among three earthquakes off the coast of Miyagi Prefecture.



(参考) 2005 年 8 月 16 日 及び 2021 年 3 月 20 日 宮城県沖の地震のすべり分布との比較

等値線は 1978 年宮城県沖地震のすべり分布 (Yamanaka et al. 2004)。矩形破線は 2005 年 8 月 16 日宮城県沖の地震の震源断層モデル (国土地理院)。

- ・ プレート面を 5kmx5km の小断層に分割してすべり分布を推定
- ・ プレート面はKita et al. (2010, EPSL)およびNakajima and Hasegawa (2006, GRL)による
- ・ ラプラシアン平滑化を採用し、ハイパーパラメータは ABIC により決定
- M_wの計算においては、剛性率を60 GPaと仮定
- ・ ☆印は震央、青丸は余震の震源(左図:本震発生(8/16 11:46)から8/16 24時まで、中図:本震発生(3/20 18:09)から3/21 11時まで、右図:本震発生(5/1 10:27)から5/1 24時まで)を表す(気象庁一元化震源を使用)

第18図 宮城県沖の地震のすべり分布と地殻変動(上下)の比較

Fig. 18 Comparison of slip distributions and vertical deformation among three earthquakes off the coast of Miyagi Prefecture.



2021 年5月1日宮城県沖の地震の震源断層モデル(暫定)

図1 北西傾斜で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。等値線は1978年宮城県沖地震のすべり分布(Yamanaka et al. 2004)。矩形破線(細字)は2005年8月16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(太字)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)。
- (下)傾斜方向(A-B)に射影した断層面(太線)及び震源分布(点)。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、点は本震発生(5/1 10:27)から 5/6 8 時までに発生した震源(気象庁一元化震源を使用)。

表 1	推定された震源断層モデルパラメータ
10.1	

経度	緯度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜	すべり角	すべり量	M	
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]	IVIW	
142.095	38.242	41.0	27.0	32.4	218.8	21.0	111.9	0.59	6.92	
(0.034)	(0.041)	(3.1)	(2.6)	(3.1)	(13.9)	(2.5)	(17.0)	(0.11)	(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。										
・ Mwと断層面積がスケーリング則(Strasser et al. 2010)に近づくよう拘束										
・ 圏	i層長さと圏	「層幅の比は」	スケーリン	· グ則(Str	asser et	al. 2010)で固定			
• M	の計算にお	いては、剛	生率を 60	GPaと仮定						

第19図 宮城県沖の地震(2021年5月1日, M6.8)の震源断層モデル

Fig. 19 Rectangular fault model of the M6.8 earthquake off the coast of Miyagi Prefecture on May 1, 2021.



矢印は観測値(黒)及び計算値(赤)の鉛直成分。

【参考】鉛直成分



【参考】事後確率分布(コーナープロット)

第 20 図 宮城県沖の地震(2021 年 5 月 1 日, M6.8)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. 20 Corner plot of estimated parameters for the MCMC rectangular fault modeling in Fig.19.





Fig. 21 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (horizontal).









Fig. 23 Accumulated crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (vertical, contour).



第 24 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. 24 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake for recent three months (horizontal).







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
950164	岩泉2	2012/02/09	アンテナ更新			2017/12/04	受信機交換			2020/11/18	アンテナ交換
950167	山田	2012/02/04	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
		2018/11/28	受信機交換	950166	矢巾	2012/01/26	アンテナ更新			2020/11/30	アンテナ更新
051145	岩手川崎A	2012/01/25	アンテナ更新			2019/02/15	受信機交換	950202	猪苗代1	2012/01/13	アンテナ更新
		2019/02/14	受信機交換			2019/12/10	アンテナ交換			2015/04/06	アンテナ交換
960549	矢本	2011/12/16	アンテナ更新	940031	本荘	2012/02/04	アンテナ更新			2019/11/22	周辺伐採
		2016/12/02	受信機交換			2018/11/29	受信機交換			2020/11/25	受信機交換
		2019/11/13	周辺伐採	950193	皆瀬	2012/03/10	アンテナ更新	950218	日光	2012/11/13	アンテナ更新
940038	相馬1	2012/01/12	アンテナ更新			2016/11/17	周辺伐採	93016	足立	2012/12/11	アンテナ更新
		2014/11/20	受信機交換			2019/02/21	受信機交換			2016/12/28	アンテナ交換
		2019/02/01	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
940041	いわき	2011/12/13	アンテナ更新			2019/10/16	受信機交換	950462	福江	2012/11/07	アンテナ更新
		2013/12/05	レドーム開閉			2019/10/31	周辺伐採			2016/02/17	受信機交換
		2017/11/01	受信機交換			2020/11/17	アンテナ更新			2021/02/04	受信機交換
93004	鉾田	2012/02/16	アンテナ更新			2020/11/17	レドーム交換				
1		2019/05/09	受信機交換								
1		2021/01/07	マンナナなな								



Fig. 26 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27図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(1/5)

Fig. 27 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28図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(2/5)

Fig. 28 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29図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(3/5)

Fig. 29 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30図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(4/5)

Fig. 30 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)



成分変化グラフ

第31図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(5/5)

Fig. 31 Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (5/5).



第 32 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. 32 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Miyako station.



第33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. 33 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Yamada station.



第34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. 34 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Yamoto station.



平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動 <u>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.</u> 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.

第 35 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. 35 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Souma-1 station.



※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36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. 36 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Choshi station.



第 37 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. 37 Crustal deformation velocity change at GEONET sites along the Pacific coast of Tohoku area at the Minase station.



• 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℃、東北~関東地方:N105℃)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38図 変位速度のプレート収束方向に関する水平勾配

Fig. 38 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.





- 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39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. 39 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(F5解)



- 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。
 たの図は、平成22年(2011年)東北地方大平洋沖地震南後の1年間の期間で推定した変位速度の
- 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 空間勾配を表す。

第40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. 40 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.