### 12-15 余効変動について

# Summary of intensive discussion subject "Post-seismic crustal deformation"

今給黎 哲郎 (国土地理院) Tetsuro Imakiire (Geospatial Information Authority of Japan)

### 1. はじめに

第190回地震予知連絡会の重点検討課題として,2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 に関する5つのトピックについての資料提出を受けレビューが行われた.本稿ではそのうちの「余効 変動について」のトピックについて概要を述べる.

### 2. 地震後の地殻変動観測結果

本震直後から,余効的な地殻変動も非常に大きくかつ広い範囲で進行していることが観測された. 第1図(国土地理院資料5-8)はGEONETによる観測結果で,2011年4月18日までの水平変動ベ クトルを示したものであるが,電子基準点「山田」で最大の約47cmの水平変動が観測され,「宮古」 で46cm,「釜石」で43cmなど,岩手県沿岸での変動が目立っている.また,電子基準点「銚子」で も31cmの水平変動が観測されている.第2図(国土地理院資料5-8)は同期間の上下変動を示した ものであるが,1)岩手県沿岸では地震時の変動と同様沈降傾向が見える,2)宮城県沿岸では地震時 の沈降とは反転して隆起となっている,3)銚子周辺でも隆起している,と言った特徴が見られる.

第3図(国土地理院資料 5-2)(a),(b),(c)はGEONET 観測点における余効変動を示す時系列グラフ である.(a)の電子基準点「山田」では、本震直後から東南東方向への水平変動が見られ、上下変動で は沈降傾向が続いている.(b)の電子基準点「河北」では、東南東方向の水平変動と、わずかな隆起 傾向が見られる.なお、隆起には4月7日のスラブ内地震(M7.1)による変動も含まれている.(c)の 電子基準点「銚子」では、東南東方向への水平変動と本震直後からの継続的な隆起傾向が見られる.

第4図(東北大学資料 5-3,5-4,5-5)(a),(b),(c)は,東北大学が東北地方に展開している GPS 観測網 による地殻変動時系列グラフである.(a)は宮城県沿岸部の観測点で,最も東側に位置する EN3(江島) と KNK(金華山)観測点で隆起傾向が見られるのが特徴である.(b)は岩手県沿岸の観測点であるが, 全て沈降傾向である.(c)は北緯 38.4 度を中心に太平洋岸から日本海岸までの観測点を並べた時系列 であるが,宮城県沿岸での隆起傾向に対比して,内陸の観測点に沈降の傾向が見られる.

3. 余効滑りのモデル

第5図(国土地理院資料 5-9)は GEONET データに基づきプレート境界の余効滑りとして地震後の地殻変動をモデル化したものである.滑り分布の特徴を見ると,余効滑りの中心は岩手沖から宮城沖にかけて推定されたが,岩手沖の方がやや沖側,宮城沖は少し陸側に推定された.また,銚子沖にも別のすべりの中心が存在することが推定されている.

第6図(国土地理院・海上保安庁資料5-19)は、海上保安庁の海底地殻変動5点を含め推定した地 震時の滑り分布と余効滑りの分布を比較したものである。地震時のすべりの中心よりもプレート境界 の深い側で余効すべりが起きていいることがわかる。また、銚子沖の余効すべりは本震の破壊域よ りも南に広がっている。

第7図(国土地理院資料5-17)は、余効滑りにより解放されたモーメントを推算した時系列グ

ラフである.本震後10日間でMw8.2相当のモーメントが解放され,1ヶ月間ではMw8.3に相当 するモーメントが解放された.

4. 中長期的な余効変動の予測(チリ地震と北海道東部沖巨大地震の事例から)

今回地震で沈降した東北地方太平洋岸は地震前の十数年間の GPS 観測,数十年から百年間の験 潮、水準測量といった測地観測では沈降傾向にあったことが知られている。しかし、地形的には海 岸段丘が形成されていることから数万年から十数万年の長期では,隆起の傾向があったと考えられ, 不整合であることが指摘されていた。第8図(産業技術総合研究所資料 5-1)は、福島県沿岸にお ける地震時及び地震間の地殻上下変動パターンについて比較したもので、[A]では地震時に福島 県沿岸で 0.3-0.5m の沈降があったこと, [B]では相馬験潮場において地震前約 40 年間は沈降傾向 (約6 mm/年の沈降速度)であったことが示されているが、[C]では12万年前頃の段丘分布が示 されており、段丘の高度が標高 30-65 m にあることから、隆起速度は 0.2-0.5 mm/ 年と推定される ような長期的隆起が想定されている.この上下変動の収支を説明するためには地震後の余効変動が 隆起の有力な候補である. 第9図 (産業技術総合研究所資料 5-2) は実際に過去の巨大地震におけ る地震後の隆起を示す事例としてチリ地震(1960)後の隆起を確認した事例を示したものである. 地震時に沈降した領域ではなく,隆起域と沈降域の中間領域であるが,地震後約40年間に約2m の隆起が確認されている. 第10 図および第11 図(産業技術総合研究所資料 5-3)は北海道東部で 17世紀に起きた巨大地震の事例である。第10図に示されるように北海道東部でも測地学的観測に よる沈降傾向と、地形学的観察による長期の隆起が整合していないが、第11回にあるように17世 紀に発生した巨大地震の後、余効滑りがプレート境界深部へ進行して地震時の沈降域が隆起したこ とが Sawai et al. (2004) による珪藻分析で示された. しかし数十年かけて隆起した量と地震間の 沈降の収支がバランスするには、現在の沈降が速すぎるため、巨大地震前に沈降が加速する可能性 が第12図(産業技術総合研究所資料5-4)のモデルで示されている.

5. まとめ

余効変動に関して, 観測結果と余効滑りとしてのモデリング, および地学的な知見や過去の巨大 地震の事例についてまとめると, 以下のようになる.

- (1) 地震後の余効変動は本震の規模に対応して非常に大きい.
- (2) 余効すべりの中心は本震の滑り領域の中心よりもプレート境界の深い側にある.
- (3) 地震時に沈降した地域のうち宮城県沿岸周辺や銚子周辺では隆起が起きている.
- (4) 長期的な上下変動の収支や過去の巨大地震の事例では地震時に沈降した海岸部での隆起が想定 されている。
- (5) しかしながら、地震直後から数ヶ月の観測では顕著な隆起は観測されておらず、数十年かけて 隆起が起きるという議論もあるため、引き続きモニタリングを行うことが重要.



第1図. 2011年東北地方太平洋沖地震 地震後の地殻水平変動 Fig. 1 Horizontal crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.



第2図. 2011年東北地方太平洋沖地震 地震後の地殻上下変動 Fig. 2 Vertical crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

#### 成分変化グラフ 期間:2011/03/01~2011/04/1

(n) (2) 福	ат (950462) → Ц В	H (950167)	東西			基準值:	1178715	. 884
2.000		_						
1.600								
1.000				_		-	-	1
1.000	-	-			-	-		
0.500								
					1			
0.000								
-0.500					-			
1.000	*							
-1.000								
-1.500		-						-
-2.000								















#### 基準値: 339072.905 (n) (12) 福江 (950462) →錦子(93022) 南北 基準値: 339072.863 0.200 0.150 0.05 0.00 -0.050 -0.10 -0.150 -0.20 (12) 福江(950462)→錦子(93022) 比高 基準値:-91.824m (n) (12) 福江(950462)→錦子(93022) 比赛 a 200E 0.150 0.100 0.05 ···· -0.05 -0.150

36/86/8 · 1103481.617m

成分変化グラフ(地震後) <sup>期間:2011/03/11~2011/04/18 JST</sup>

# 26.48 · 1103481.860m

28cm

14cm

基準値:-91,875m

5cm

(n) (12) 福江(950462)→銚子(93022) 東西

0 150 0.10 0.050

0.000 -0.050

-0.100 -0.200



成分変化グラフ <sup>期間:2011/03/01~2011/04/18 JST</sup>

(m) (12) 福江(950462)→銚子(93022) 東西

### 銚子では本震直後から隆起の傾向が見られる 国土地理院資料 5-7



## 第3図 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

(a) 電子基	準点「山田」	」(岩手県)	における時系列
(b) 電子基	準点「河北	」(宮城県)	における時系列
(c) 電子基	準点「銚子」	」(千葉県)	における時系列

Fig. 3 Crustal deformation before and after the 2011 off the

Pacific coast of Tohoku Earthquake
(a) Time series at GEONET site "Yamada" in Iwate prefecture
(b) Time series at GEONET site "Kahoku" in Miyagi prefecture

(c) Time series at GEONET site "Choshi" in Chiba prefecture





- 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動(東北大学による観測点 第4図. および GEONET 点) (a) 宮城県沿岸の GPS 観測点における時系列 (b) 岩手県沿岸の GPS 観測点における時系列 (c) 北緯 38.4 度を中心とした東西帯の GPS 点における時系列
- Crustal deformation after the 2011 off the Pacific coast of Fig.4 Tohoku Earthquake at GPS sites of the observation network by Tohoku University and GEONET sites.

  - (a) Time series at GPS sites in Miyagi prefecture
    (b) Time series at GPS sites in Miyagi prefecture
    (c) Time series at GPS sites in the east-west section along N38.4 zone.



第5図. 2011年東北地方太平洋沖地震 地震後の滑り分布モデル

Fig. 5 The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Slip distribution on the plate interface after the mainshock.



- 第6図. 2011年東北地方太平洋沖地震 地震時と地震後のプレート境界面上の滑り分布の比較(地震時の滑り分布は海上保安庁による海底地殻変動観測値も含んだモデルによる) Fig. 6 The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Comparison between coseismic and
- Fig. 6 The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Comparison between coseismic and postseismic slip distribution on the plate interface (coseismic slip distribution model is based on GEONET data and seafloor crustal deformation data by Japan Coast Guard).



第7図. 2011年東北地方太平洋沖地震後に解放されたモーメントの時間変化

Fig. 7 Time evolution of the estimated moment released by afterslip of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.



東北地方太平洋岸における測地学的観測による地震時・地震間の地殻上下変動と地学的観察 第8図. による長期の地殻上下変動の比較

[A] 国土地理院の GPS 観測による 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻上下変動 [B] 相馬の 1972 年以降の験潮データに基づく地殻変動 [C] 福島県沿岸に分布する 12 万年前頃の海岸段丘の分布と高度

Comparison between the results of geodetic observation on coseismic and interseismic Fig. 8 vertical crustal deformation and long term vertical crustal deformation estimated from geological evidence on the Pacific coast of Tohoku region.

[A] Coseismic vertical crustal deformation of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake by GEONET observation

[B] Interseismic vertical crustal deformation at Soma tidal station scince 1972

[C] The distribution and height of marine terraces fromed about 120 thousand years B.P. along the Pacific coast of Fukushima prefecture



第9図. チリ地震後の余効変動による地殻の隆起 A:1960年チリ地震に伴う隆起域と沈降域の分布, B:聞き取り調査と旧汀線高度の計測を行った地点.
C:Plafker and Savage (1970)による1960年チリ地震時の変動(◇)とその後1968年までの 変動(○), Barrientos et al. (1992)による地震後1989年までの変動(△), 産総研が明らかに した地震後2004年までの変動(宍倉ほか, 2004). BとCは上下で調査地点が対応している.

Fig.9 Postseismic uplift after the Chile Earthquake (1960)

[A] Distribution of uplift area and subsided area by the coseismic crustal movement caused by the Chile Earthquake (1960)

[B] Site map for interview and field survey to determine the height of shoreline. [C] Coseismic vertical deformation caused by the Chile Earthquake(1960)( $\diamondsuit$ ) and postseismic deformation until 1968( $\bigcirc$ ), determined by Plafker and Savage (1970), postseismic deformation until 1989( $\bigcirc$ ) determined by Barrientos et al. (1992), and postseismic deformation until 2004 (
) determined by Shishikura et al. (2004) Plots on [C] is corresponding to the sites on the map [B].



- 第10回. 北海道東部太平洋岸における測地学的観測による地震時・地震間の地殻上下変動と地学的観察による長期の地殻上下変動
  - [A] 根室市花咲の1954年以降の験潮データに基づく地殻変動
  - [B] 根室市落石沿岸に分布する 20 万年前頃の海岸段丘
- Fig.10 The geodetic observation on interseismic vertical crustal deformation(subsidence) and long term vertical crustal deformation(uplift) estimated from geological evidence on the Pacific coast of eastern Hokkaido region.

[A] Interseismic vertical crustal deformation at Hanasaki tidal station in Nemuro city scince 1972

 $[\mathrm{B}]$  The marine terraces formed about 200 thousand years B.P. at the Ochiishi coast in Nemuro city.

- 第11図. 千島海溝沿いの17世紀の連動型地震に伴う地震時の変動と余効変動を説明するモデル
- Fig.11 A model for coseismic and postseismic crustal deformation relationg to the mega earthquake occurred along the Kuril trench in 17th century.



第 12 図. 北海道東部における連動型地震の地殻変動サイクルの一つの仮説 Fif.12 Crustal deformation cycle in the eastern Hokkaido region relating to the repeating mega earthquake.