

2010年福島県中通りの地震 (M5.7) のSAR干渉解析
InSAR Analysis of the 2010 Fukushima-ken Nakadori Earthquake (M5.7)

地理地殻活動研究センター 小林知勝・飛田幹男
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Tomokazu KOBAYASHI and Mikio TOBITA
測地部 鈴木 啓・野口優子
Geodetic Department
Akira SUZUKI and Yuko NOGUCHI

要 旨

2010年9月29日に発生した福島県中通りの地震 (M5.7) に伴う地殻変動を抽出する目的で、陸域観測技術衛星「だいち」の合成開口レーダーデータを用いたSAR (Synthetic Aperture Radar. 以下、「SAR」という。)干渉解析を行った。解析の結果、震央近くの戸倉山を中心に12cmを超える衛星-地表間距離の短縮を示す地殻変動が観測された。干渉解析結果をもとに、半無限弾性体中での矩形断層一様滑りを仮定した震源断層モデルを構築したところ、ほぼ南北方向の走向をもつ傾斜角 65° の断層面上で、滑り角を約 80° とする逆断層成分が卓越する滑りが起きたと推定された。震源断層は戸倉山のやや東の深さ2kmの位置に求められた。モデル計算により推定された断層の深さは、気象庁一元化震源カタログの深さ(約8km)より有意に浅い。8kmの深さではMw5.5相当の断層滑りを与えても位相変化量は最大でも-2cm程度であり、観測量を説明するためには深さ2km付近で断層の滑りが必要であることがフォワードモデル計算からも示された。また、断層運動に伴う地殻変動のほかに、戸倉山東部の斜面の一部に地震性の地殻変動とは異なる衛星-地表間距離の伸長を示す地表変位が観測された。地形傾斜との相関から地滑り性の地表変位と考えられる。斜面の傾斜方向に沿った地表滑りによるものと仮定すると、おおよそ12cmの滑りで観測された変位量の約6cmを説明できる。

1. はじめに

2010年9月29日17時00分頃、福島県中通り (37.285° N, 140.025° E)でM5.7の地震が発生した(以下、「本地震」という。)(図-1)。この地震は、最大の計測震度が4であったが、局所的に震度5弱の揺れがあったと推定されている(福島地方気象台, 2010)。震源付近の天栄村では、屋根瓦の破損や道路の亀裂などの被害が報告された(福島地方気象台, 2010)。

本地震は、GEONET観測点でも、わずかながらその地殻変動が捉えられた(図-1)。震源の西/東側で

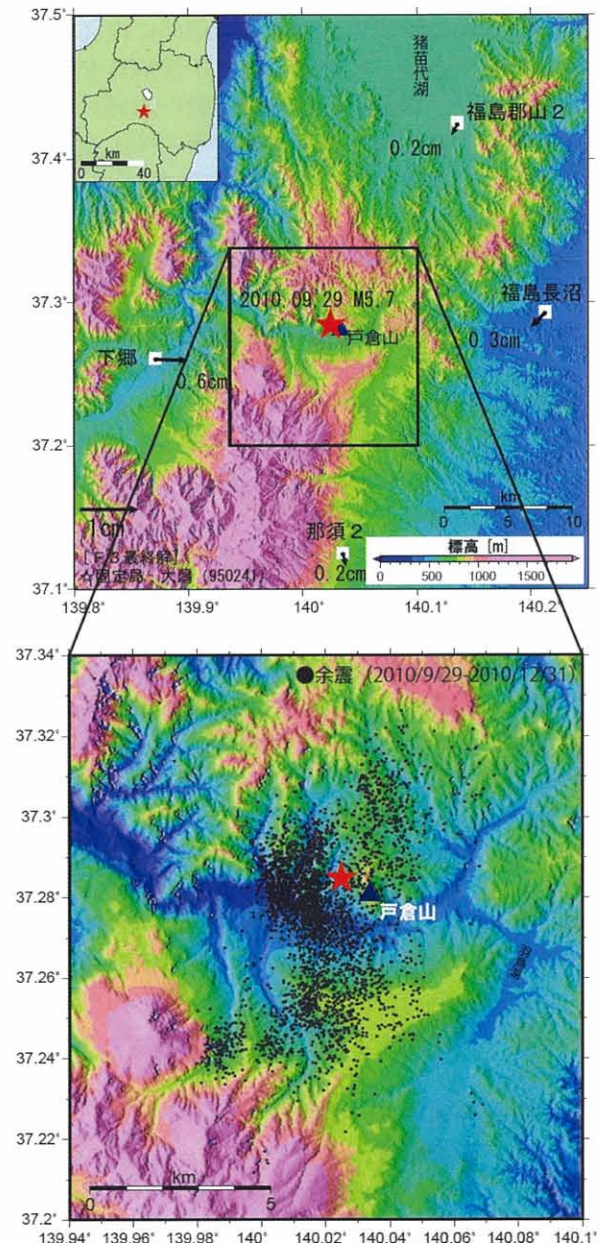


図-1 2010年福島県中通りの地震 (M5.7) の震央の位置 (★印) と GEONET 観測点 (□印) で検出された地震に伴う地殻変動。●印は気象庁一元化震源カタログからの余震 (2010/9/29-2010/12/31) を示す。

は東/西向きの変位が観測され、東西方向の短縮を示す変動があったことがわかる。しかしながら、震源に最も近接する観測点は震央から約 15km 離れ、観測された変動量は最大でも 0.6cm と小さく、GEONET 観測点のみから地殻変動の詳細を把握するのは困難であった。

SAR 干渉法は、マイクロ波レーダー観測を地表の同一地点で 2 回以上実施し、反射波の位相差をとることによって、地表の変動を捉える技術である。mm 単位の精度で地殻変動を捉えられる GPS と比べて測定精度は cm オーダーとやや劣るものの、数十 m 程度の高い空間分解能で地表変位を面的に捉えることのできる長所を持っている。SAR 干渉解析を適用することにより、震源近傍の地殻変動の詳細が高空間分解能で面的に抽出され、震源断層に関する情報が得られることが期待される。本稿では、SAR 干渉解析の結果とそれをもとにして構築した震源断層モデルについて報告する。

2. SAR 干渉解析による地殻変動分布図

本解析には、(独)宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の陸域観測技術衛星「だいち」のデータを使用した。「だいち」搭載の SAR センサ (PALSAR) が照射する L バンド・マイクロ波は波長が長く、植生を透過して地表状態を把握できることから、本地震の震源領域のような山地の観測に最適である。

図-2 は 2010 年 8 月 19 日と 2010 年 10 月 4 日に撮像された path405 (北行軌道) のデータペアによる SAR 干渉解析結果である。震央近くの戸倉山を中心に最大約 12cm の衛星-地表間距離の短縮が観測された。地殻変動は 5 km 超四方の範囲に見られ、余震発生領域の主に北側に分布している。

観測された地殻変動の楕円状のプリンジは完全に閉じていない。これは戸倉山東部の田良尾地区の一部に、地震性の地殻変動とは異なる衛星-地表間距離の伸長を示す変位があるためである。地形傾斜を考慮してこの変位領域を調べると、伸長域はちょうど東傾斜面に対応しており (図-3)、このことから地滑り性の地表変位と考えられる。

3. 震源断層モデルの推定

3.1 解析手法

観測された地殻変動源を求めるため、半無限弾性体中の矩形断層一様滑りを仮定した震源断層モデル計算を行った。推定には、Simulated Annealing (焼きなまし) 法 (e.g., Cervelli et al., 2001) を適用し、位置 (緯度・経度・深さ) 及び断層パラメータ (断層長, 断層幅, 走向, 傾斜角, 滑り角, 滑り量) の最適解を求めた。パラメータの探索範囲はそれぞれ, $140.01^{\circ} \text{ E} \sim 140.06^{\circ} \text{ E}$, $37.26^{\circ} \text{ N} \sim 37.30^{\circ} \text{ N}$,

$0.5 \sim 10.0 \text{ km}$, $1 \sim 10 \text{ km}$, $1 \sim 5 \text{ km}$, $150 \sim 180^{\circ}$, $50 \sim 90^{\circ}$, $70 \sim 110^{\circ}$, $0.1 \sim 2.0 \text{ m}$ とした。ここで、余震分布から西傾斜の断層面を仮定し、走向, 傾斜角, 滑り角の探索範囲は気象庁及び F-net の CMT 解を参考にして設定した。また、各変数の誤差推定にはブートストラップ法を適用した (Efron, 1979)。ブートストラップの反復回数は 200 回とした。本解析では、Jónsson et al. (2002) に従った Quadtree Decomposition アルゴリズムを適用して SAR 干渉データをリサンプリングし、モデリング解析に適切なデータセットを作成した。

3.2 震源断層モデル

図-4 及び図-5 に、SAR 干渉解析データを用いたモデリング結果を示す。図中の白枠は推定された断層面を示す。断層は戸倉山のやや東の深さ 1.9km (断層中心) に求まる (表-1)。北北西-南南東方向の走向をもち、断層面の傾斜角は 65° と見積もら

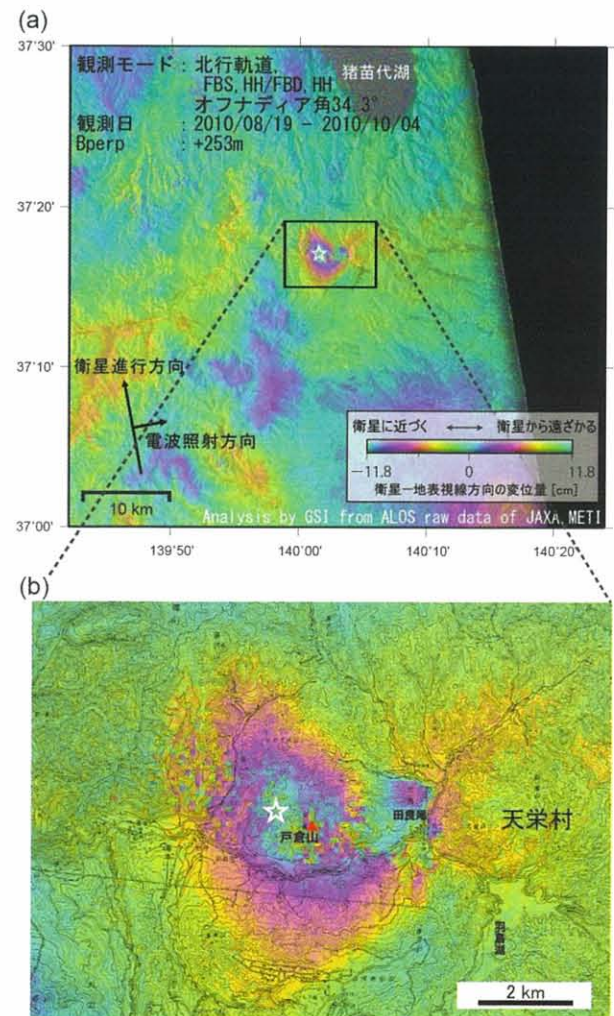


図-2 2010年8月19日と2010年10月4日に撮像された SAR データを用いて得られた干渉画像。

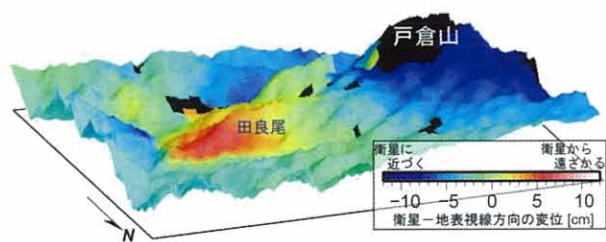


図-3 地滑り性の地表変位と地形傾斜の関係. N20° E 方向から眺めた鳥瞰図.

れた. 滑り角は約 80° で, 逆断層成分が卓越する断層運動である. この断層運動により解放された地震モーメントは 1.5×10^{17} Nm (Mw=5.4) である. ここで剛性率は 40GPa を仮定した. 気象庁及び (独) 防災科学技術研究所 F-net の CMT 解から推定されるモーメントはともに 2.3×10^{17} Nm (Mw5.5) であり, SAR 干渉解析から推定された値はこれらとほぼ調和的である. 求められた震源断層モデルから計算される変位量 (図-4 (b)) は, 観測された変位量 (図-4 (a)) をほぼ説明し, 残差 (図-4 (c)) は干渉画像の誤差レベル以下となる.

4. 議論

4. 1 震源の深さに関する考察

推定された断層の位置は浅く (深さ 1.9km), 気象庁一元化震源の深さ (8 km) より約 6 km 浅い. 深さの推定精度は 1.2km (2σ) であり, この違いは有意と考えられる. 断層深さの位置が浅いことは簡単なフォワードモデル計算からも推測できる. 図-6 は, 気象庁の CMT 解をもとに深さを変えて計算した位相変化量である. ここでは, 断層中心位置の深さを, 2 km, 5 km, 8 km と変えて計算した. 深さ 8 km で Mw5.5 のモーメント相当の断層滑りを与えても, 位相変化量は最大約 -2 cm である. その深さを 5 km と浅くしても, 変位量は観測量の半分程度である. 深さをさらに 2 km まで浅くすると, 観測量とほぼ同じ地殻変動量がやっと再現できることがわかる. 地震波の走時データを用いた震源位置の推定は, 一般的に計算に使用する地下構造モデルの影響を受ける. 例えば, 浅部に遅い速度構造が広がっている場合 (しばしば火山地域) には, それより速い構造を仮定して計算を行うと, より深い位置に震源を推定する傾向となる. 一方, 地殻変動データによる推定は, 地下の物性構造の不確実性から受ける影響が小さい. 高い地震観測網密度を有する日本においても, SAR 干渉解析による観測が, 特に浅い地震において, 断層破壊を起こした位置の推定に有効に機能し得ることを本解析事例は示していると言える.

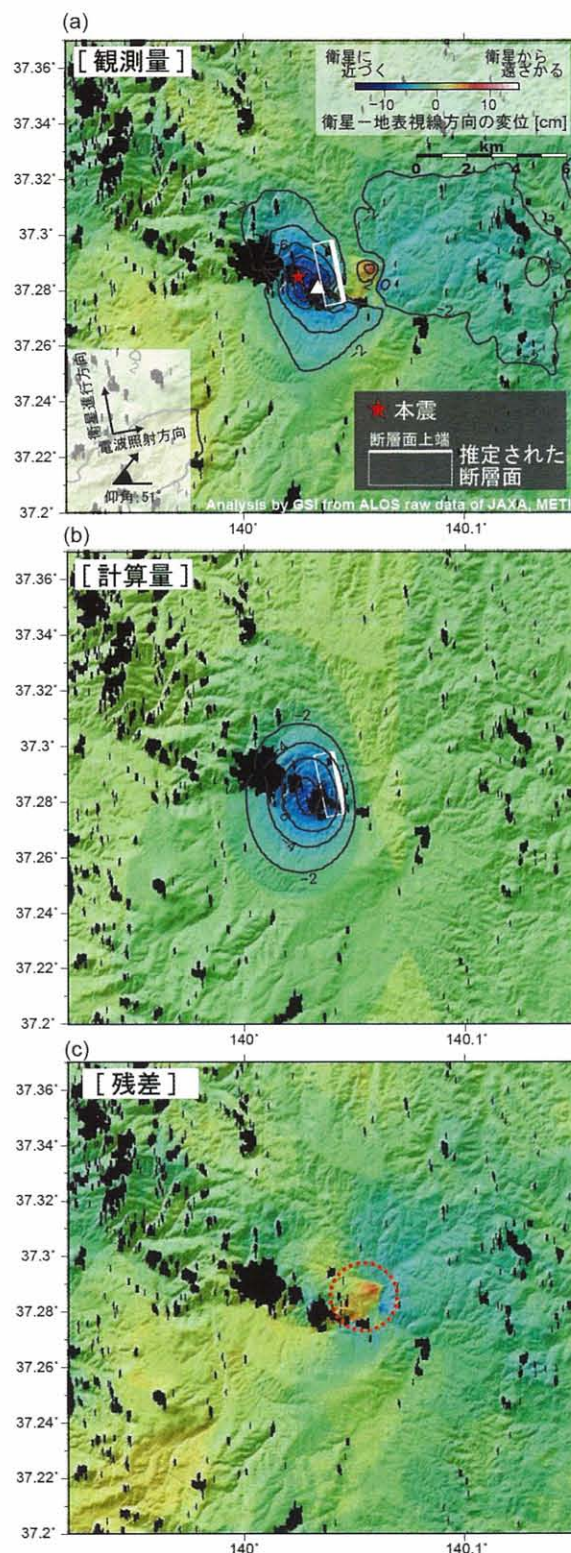


図-4 SAR 干渉解析結果を用いたモデリング結果. (a) 観測量. (b) 推定されたモデルからの計算量. (c) 残差. 実線は 2 cm 間隔の等量線を示す.

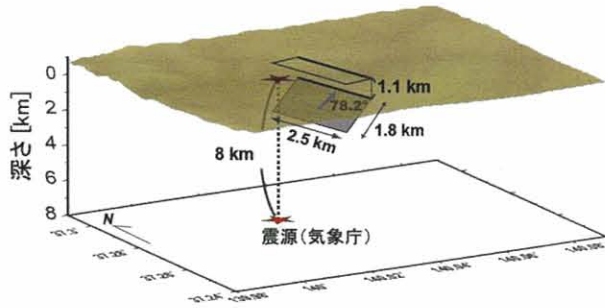


図-5 震源断層モデルの概念図。

4. 2 地滑り性の変位についての考察

2章で触れたように、干渉画像には地震に伴う地殻変動性の地表変位とは思われない変位が、戸倉山東部の田良尾地区に衛星視線方向距離の伸長として見られる。残差分布(図-4(c))には、震源断層モデルでは説明できない変位として残存している(点線赤丸)。その大きさは最大約6cmである。

ここで、この局所的な位相変化量が全て傾斜面に沿って地表が移動したものと仮定する。ある地点での斜面の傾斜方向のベクトルを s 、衛星視線方向単位ベクトルを $u_{\Delta LOS}$ とする。準拠する座標系は東西、南北、上下方向の3成分直交座標とし、それぞれ東向き、北向き、上向きを+とする。 $u_{\Delta LOS}$ の大きさが1であるので、両者の内積は、衛星視線方向の距離変化量 ΔLOS と等価になる。

$$\begin{aligned} u_{\Delta LOS} \cdot s &= |u_{\Delta LOS}| |s| \cos\theta \\ &= s \cos\theta \quad (1) \\ &= \Delta LOS \end{aligned}$$

ここで θ は、傾斜方向ベクトル s と衛星視線方向単位ベクトル $u_{\Delta LOS}$ とがなす角度、 s は地表滑り量を示す。傾斜方向の単位ベクトルを u_s とすると、滑り量 s は以下の式から計算できる。

$$s = \frac{\Delta LOS}{u_{\Delta LOS} \cdot u_s} \quad (2)$$

ΔLOS 値と $u_{\Delta LOS}$ は既知なので、傾斜方向の単位ベクトル u_s が与えられれば滑り量が計算できる。

今、地滑り性の変位が観測されている領域の斜面を東北東向きで傾斜角が 10° とみなす。このとき傾斜方向の単位ベクトルは $(0.91, 0.38, 0.17)$ となり、(2)式から、傾斜面方向の地表滑り量は12cmと見積もられる。

上記の見積もりは、変位領域の傾斜面を単一の平面とみなした概算であり、より正確な算出にはピクセル毎の計算が必要である。なお、DEM(数値標高モデル)を用いてピクセル毎の傾斜方向ベクトルを見積もり、それをもとに各ピクセルでの地表滑り量を算出することも試みたが、傾斜方向ベクトルのばらつきが一部の領域で(特に谷地形に沿って)大きくなり、それに伴い滑り量もばらつき、結果的に短波

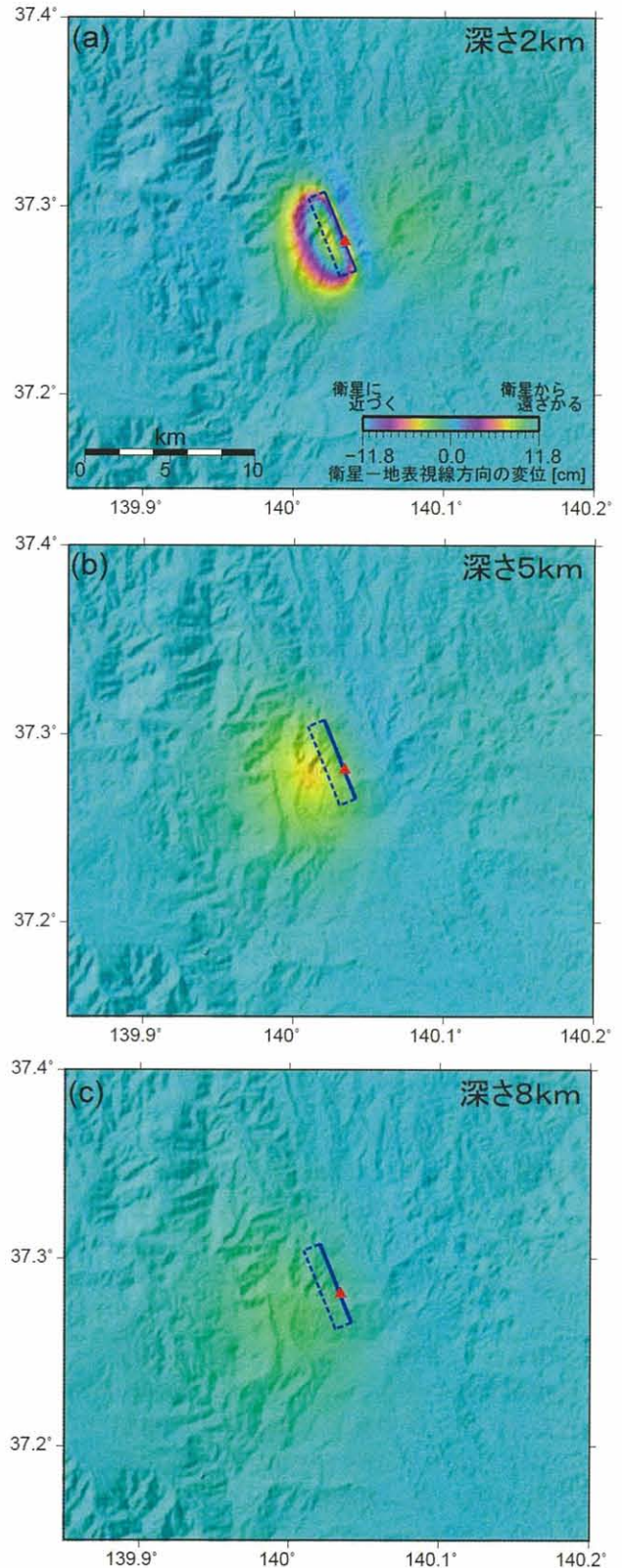


図-6 断層の深さと位相変化量の関係。断層パラメータは気象庁 CMT 解(走向=158°, 傾斜角=66°, 滑り角=79°)を使用。断層長, 断層幅はそれぞれ5 km, 2.5km とし, 滑り量は 50cm を与えた (Mw=5.5 に相当)。

表-1 推定されたモデルパラメータ。
緯度, 経度, 深さは断層中心位置を示す。

経度 (1 σ)	緯度 (1 σ)	深さ (1 σ)	長さ (1 σ)	幅 (1 σ)	走向 (1 σ)	傾斜角 (1 σ)	滑り角 (1 σ)	滑り量 (1 σ)
[°]	[°]	[km]	[km]	[km]	[°]	[°]	[°]	[m]
140.039	37.286	1.9	2.5	1.8	168	65	78	0.9
(0.005)	(0.004)	(0.6)	(1.5)	(1.0)	(8)	(8)	(10)	(0.2)

長のノイズが含まれた。この問題を回避するには短波長ノイズを抑えるような平滑化処理などが必要となろうが、本研究では単一平面による概算に留め、さらなる発展的な処理に関しては将来の課題とする。

5. まとめ

陸域観測技術衛星「だいち」による合成開口レーダー (SAR) データを用いた干渉解析により、2010年福島県中通りの地震 (M5.7) に伴う地殻変動を捉えた。半無限弾性体中の矩形断層一様滑りモデルを仮定した計算によると、ほぼ南北方向の走向をもつ傾斜角 65° の断層面上で、滑り角を約 80° とする逆断層成分が卓越する滑りが起きたと推定された。この断層運動により解放された地震モーメントは $1.5 \times 10^{17} \text{Nm}$ (Mw=5.4) であった。断層は戸倉山のやや東の深さ約 2 km の位置に求まった。この深さは地震波から計算された震源位置より約 6 km 浅い。深さを可変にしたフォワードモデル計算からは、8 km の深さで

予想される変位量は最大でも約 -2 cm 程度であり、観測量を説明するには 2 km 付近で断層滑りが発生する必要があることが示された。また、戸倉山東部の一部に地震性の地殻変動とは異なる衛星-地表間距離の伸長を示す地表変位が観測された。地形傾斜との相関から地滑り性の地表変位と考えられる。観測された変位が斜面の傾斜方向に沿った地表滑りによるものと仮定すると、おおよそ 12 cm の地表滑りで観測された変動量の約 6 cm を説明できる。

謝辞

本研究で使用した「だいち」の PALSAR データの所有権は、(独) 宇宙航空研究開発機構及び経済産業省にあります。これらのデータは、(独) 宇宙航空研究開発機構との共同研究協定に基づいて、提供を受けています。また、本研究では気象庁一元化震源カタログを使用しました。この場を借りて、御礼申し上げます。

参考文献

- Cervelli, P., M. H. Murray, P. Segall, Y. Aoki, and T. Kato (2001): Estimating source parameters from deformation data, with an application to the March 1997 earthquake swarm off the Izu Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, 106, 11217-11237.
- Efron, B. (1979): Bootstrap methods: another look at the jackknife, *Annals of Statistics*, 7, 1-26.
- 福島地方気象台, 2010: 平成22年9月29日17時00分頃の福島県中通りの地震に関する現地調査について (気象庁機動調査班調査結果報告), 報道発表資料.
- Jónsson, S., H. Zebker, P. Segall and F. Amelung (2001): Fault slip distribution of the 1999 M7.2 Hector Mine earthquake, California, estimated from satellite radar and GPS measurements, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, Vol. 92, No. 4, 1377-1389.