

「だいち」 SAR 干渉解析による豊後水道周辺の非定常地殻変動抽出の試み
 An Attempt to Detect Transient Crustal Deformation around
 the Bungo Channel by SAR Interferometry Using PALSAR Data

測地部 野口優子・鈴木 啓

Geodetic Department Yuko NOGUCHI, Akira SUZUKI

地理地殻活動研究センター 飛田幹男・小林知勝

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Mikio TOBITA, Tomokazu KOBAYASHI

測地観測センター 矢来博司

Geodetic Observation Center Hiroshi YARAI

要 旨

国土地理院は、陸域観測技術衛星「だいち」に搭載されているLバンド合成開口レーダーの観測データを用いて、SAR 干渉解析を定常的に実施している。定常的に監視する解析地域は、地盤沈下・火山・地すべり地域を対象としている。これらの地域以外に、地震等の災害発生時には緊急的な解析を実施し、地殻変動を空間的に把握することを行っている。

2009 年秋頃から豊後水道では、通常とは異なる非定常的な地殻変動が GEONET の観測により捉えられている。この地域では、1997 年および 2003 年にも同様の地殻変動が観測されており、プレート境界面で「ゆっくり滑り（スロースリップ）現象」（以下、「スロースリップ」という。）が発生したと推定されている。プレート境界面での滑り領域を推定する上で、空間的に詳細な地殻変動を把握し、その情報を共有することは重要である。そこで本地域において SAR 干渉解析を実施し、非定常的な地殻変動を空間的により詳細に把握する試みを行った。その結果、スロースリップに伴う地表変位の空間分布やその変動量を、東西方向及び上下方向の成分に分離して把握することができた。

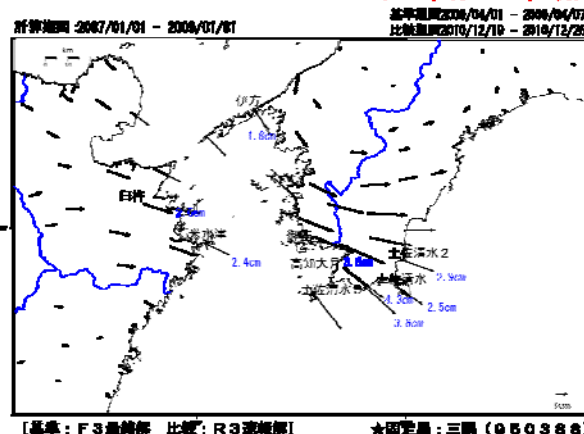
1. はじめに

宇宙測地技術のひとつである干渉合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar Interferometry. 以下、「干渉 SAR」という。）は、分解能の高い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、数 10km 範囲の地表変動を面的に捉えることのできる技術である。国土地理院では、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA）によって 2006 年 1 月に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」（Advanced Land Observing Satellite: ALOS）に搭載された L バンド合成開口レーダー（Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar: PALSAR）を用いた高精度地盤変動測量を実施している。この高精度地盤変動測量では、地盤沈下・火

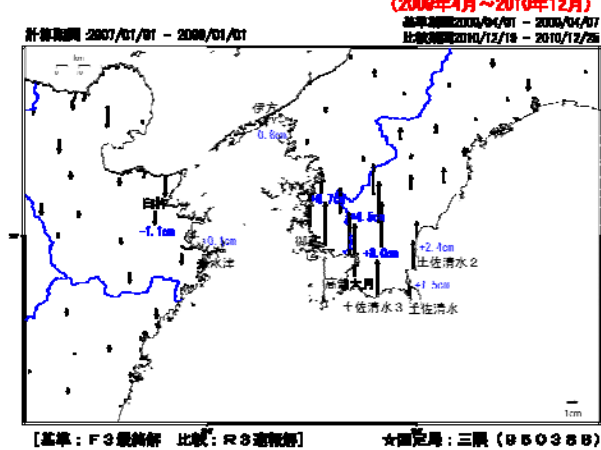
山・地すべりによる地殻・地盤変動の監視を目的とした定常的な監視や、地震等の災害発生時には緊急的な解析を実施している。これらの結果は国土地理院のホームページ（<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/result/result.html>）で公開し、国土・環境の保全を目的とした地理空間情報の提供を目指している。

2009 年秋頃から豊後水道では、通常とは異なる非定常的な地殻変動（スロースリップ）が GEONET の観測により捉えられた（図-1）。なお、図-1 はプレートの沈み込み等に伴う定常的な地殻変動（変動速度は一定と仮定）を取り除いた“1 次トレンド除去”と、季節変化に応じて変化する大気の状態（温度・湿度・気圧等）に起因する年周誤差や、半年の周期を持った現象（電離層・朝夕等）に起因する半年周誤差を取り除いた“年周・半年周成分除去”を行い、非定常的な地殻変動変動を見やすく表示している。スロースリップを捉えた GEONET の GPS 連続観測点（電子基準点）は全国に 1,240 点設置されているが、平均的な観測点間距離は約 20km である。そこで本稿では、豊後水道周辺について SAR 干渉解析を実施し、非定常的な地殻変動を空間的により詳細に把握する試みを行ったので報告する。

(a) 1 次トレンド・年周・半年周成分除去後 変位ベクトル図（水平）
 (2009年4月～2010年12月)



(b) 1次トレンド・年間・半年周成分除去後 変動ベクトル図 (上下)



(c) 1次トレンド・年間・半年周成分除去後グラフ

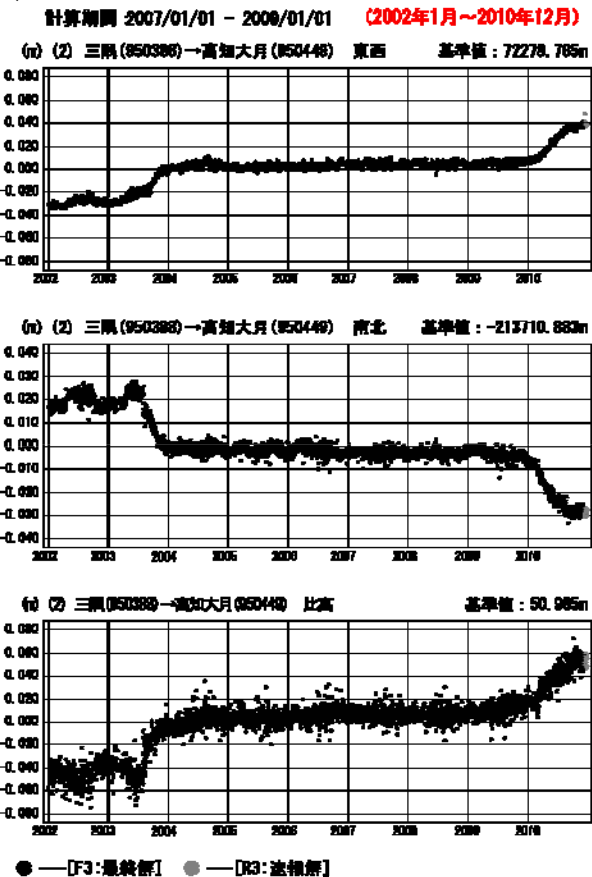


図-1 豊後水道周辺の非定常的な変動
 (a) 非定常変動ベクトル図 (水平成分)
 (b) 非定常変動ベクトル図 (上下成分)
 (c) 非定常変動時系列

対象地域である豊後水道は、九州の大分県と四国の愛媛県に挟まれている (図-2)。定常的に足摺岬周辺においては、北西方向に年間3~4cm程度の水平変動が生じている (図-3 (a):三隅観測局固定)。上下方向については、年間を通してほぼ変動してい

ない (図-3 (b) :三隅観測局固定)。

豊後水道から足摺岬にかけてのプレート境界におけるスロースリップは1997年および2003年にも発生しており (Ozawa et al., 2007), 今回は約6年ぶりの発生となる。

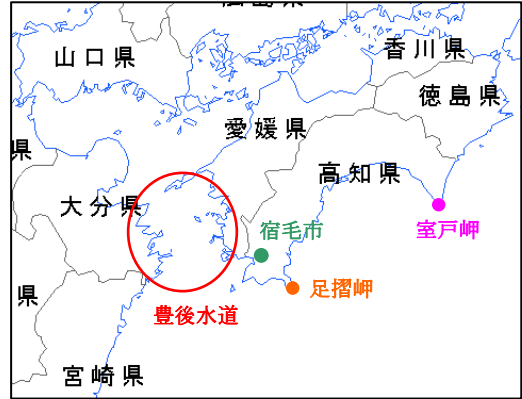
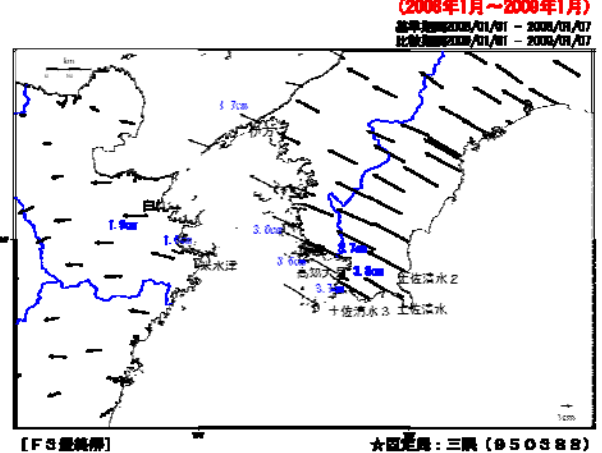


図-2 豊後水道位置図

(a) 変動ベクトル図 (水平)



(b) 変動ベクトル図 (上下)

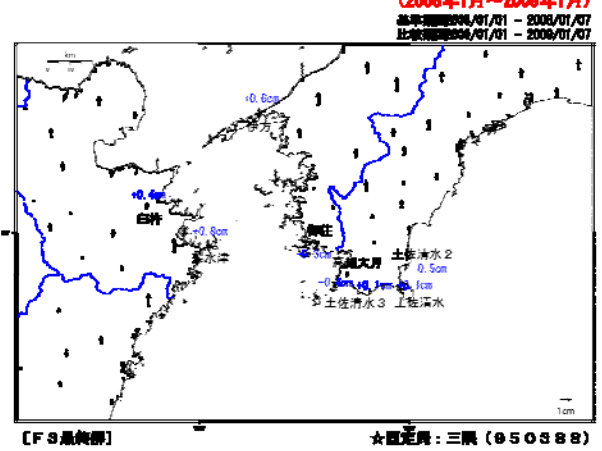


図-3 豊後水道周辺の定常的な変動
 (a) 定常変動ベクトル図 (水平成分)
 (b) 定常変動ベクトル図 (上下成分)

2. 解析

2.1 解析手法

スロースリップそのものによる地殻変動（本稿では「非定常変動」として扱う。）を把握するために、図-1と同様に“1次トレンド除去”作業を含んだ以下の①～④の手順で解析を行うこととした。なお，“年周・半年周成分除去”については，SAR 干渉解析でそれらの成分の抽出・除去は精度上非常に困難であることから今回は実施しない。

① スロースリップ開始前のみで形成されるペア（定常ペア）を複数解析する。このとき，各ペアの解析では，GEONET データを用いて変動の長波長成分の補正（飛田ほか，2005）を行う。次に，これらをスタッキングすることで，各ペアに含まれる気象ノイズ等を低減させた。以上の処理を経て得られた結果（1次トレンド成分）を，本稿では「定常変動」として扱う。

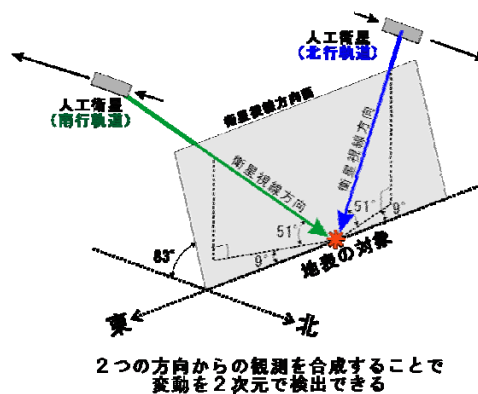
なおスタッキングとは，複数の SAR 干渉解析の結果を足し合わせ，期間の合計で割ることであり，これにより平均変動速度が求まる。複数のデータを足し合わせることで，大気等に起因する時間的にランダムな誤差が低減され S/N 比が向上する。

② スロースリップ期間を含むペア（非定常ペア）を解析し，「定常変動+非定常変動」を検出する。

③ ①で検出した「定常変動」を②の解析結果から差し引くことで（1次トレンド除去），「非定常変動」を抽出する。なお，①～③は北行軌道（Ascending），南行軌道（Descending）の両方向について行う。

④ ③の結果を用いて 2.5 次元解析（Fujiwara et al., 2000）を行い，非定常変動の東西方向及び上下方向の空間分布を求める。

なお 2.5 次元解析とは，1 方向の解析結果からは衛星視線方向の変動量しか求められないため，Ascending と Descending の 2 方向の解析結果を合成することで，変動量を東西方向と上下方向の成分へ分離する手法である。この上下方向は，分離前の衛星視線方向が正確な東西方向ではないという理由から，厳密には水平面から約 80° 南側へ傾く方向となる（図-4）。



2つの方向からの観測を合成することで変動を2次元で検出できる

図-4 2.5次元解析の概念図

2.2 「定常変動」の検出

解析には，Path420, Frame640-650 (Ascending)，Path70, Frame2950-2960 (Descending) を用いた。「定常ペア」として，基線長垂直成分 (Bperp) が短く，かつスロースリップ期間を含まず比較的時間間隔の長いペア（2007年1月～2010年1月のデータを使用）を選び干渉解析を行った。これらの定常ペアのうち，水蒸気等のノイズが少ないペア（Ascending では4ペア，Descending では3ペア，表-1，図-5）を選び，スタッキングを行った（図-6）。定常的な変動は北西方向であるため，衛星進行方向が定常変動方向に概ね直角する Descending では変動に対する感度は高く，衛星進行方向が定常変動方向に概ね平行する Ascending では変動に対する感度は低くなる。それを反映し図-6では，Descending では宿毛市を中心として衛星から遠ざかる向きの変動が明瞭に見られるのに対し，Ascending では変動が明瞭でない。また定常変動を検出した結果から 2.5 次元解析を行い，東西方向及び上下方向の空間分布を求めた（図-7）。その結果，3 cm 程度の西向き，1 cm 未満の沈降を確認し，GEONET の結果（図-3）と調和的であった。

表-1 スタッキングに用いた解析データ

衛星進行方向		マスター	スレーブ
北行 (Ascending)	①	2007/01/18	2008/09/07
	②	2007/12/06	2010/01/26
	③	2008/01/21	2009/12/11
	④	2009/01/23	2009/09/10
南行 (Descending)	⑤	2007/04/04	2009/11/25
	⑥	2007/11/20	2010/01/10
	⑦	2009/01/07	2009/10/10

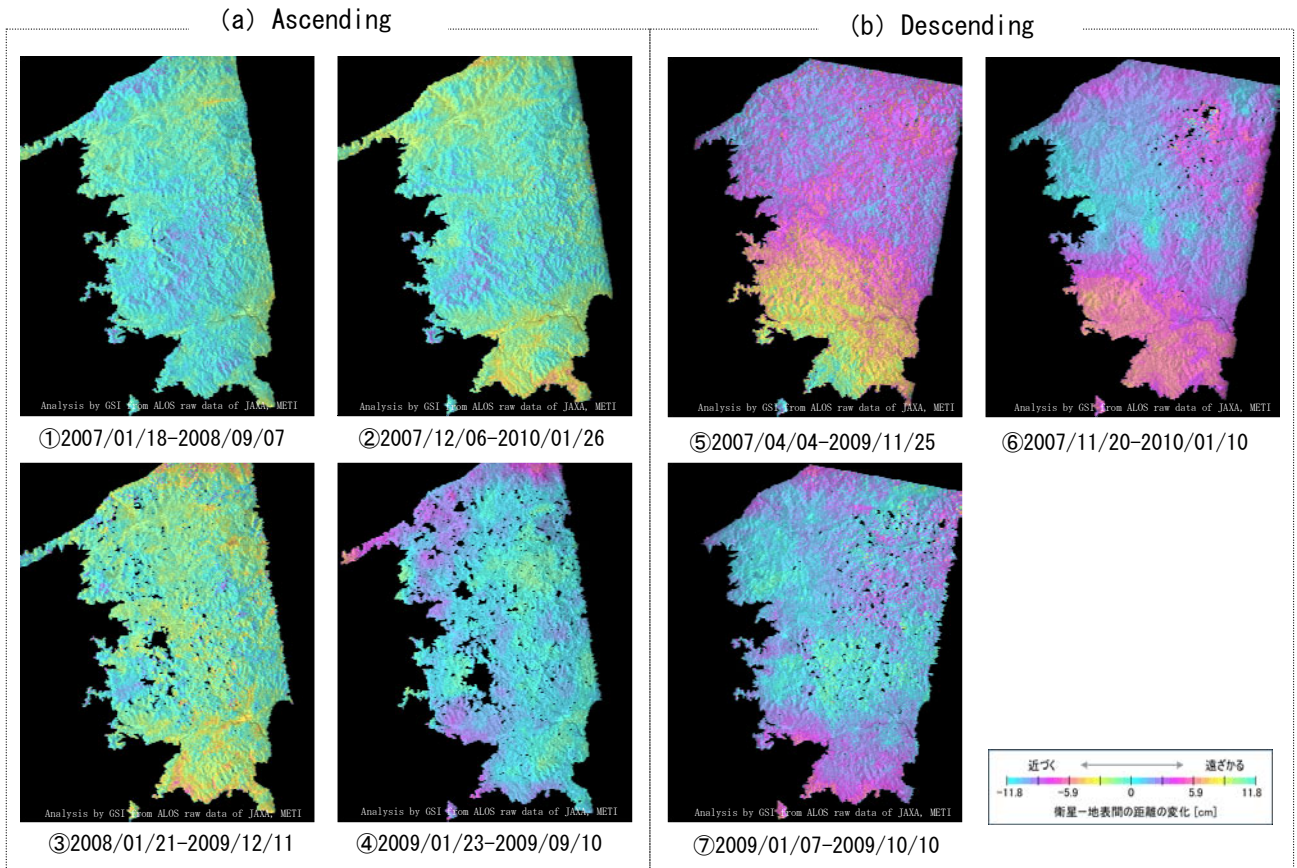


図-5 スタッキングに用いた解析結果 (アンラップ画像) (a) Ascending : 4 ペア (b) Descending : 3 ペア

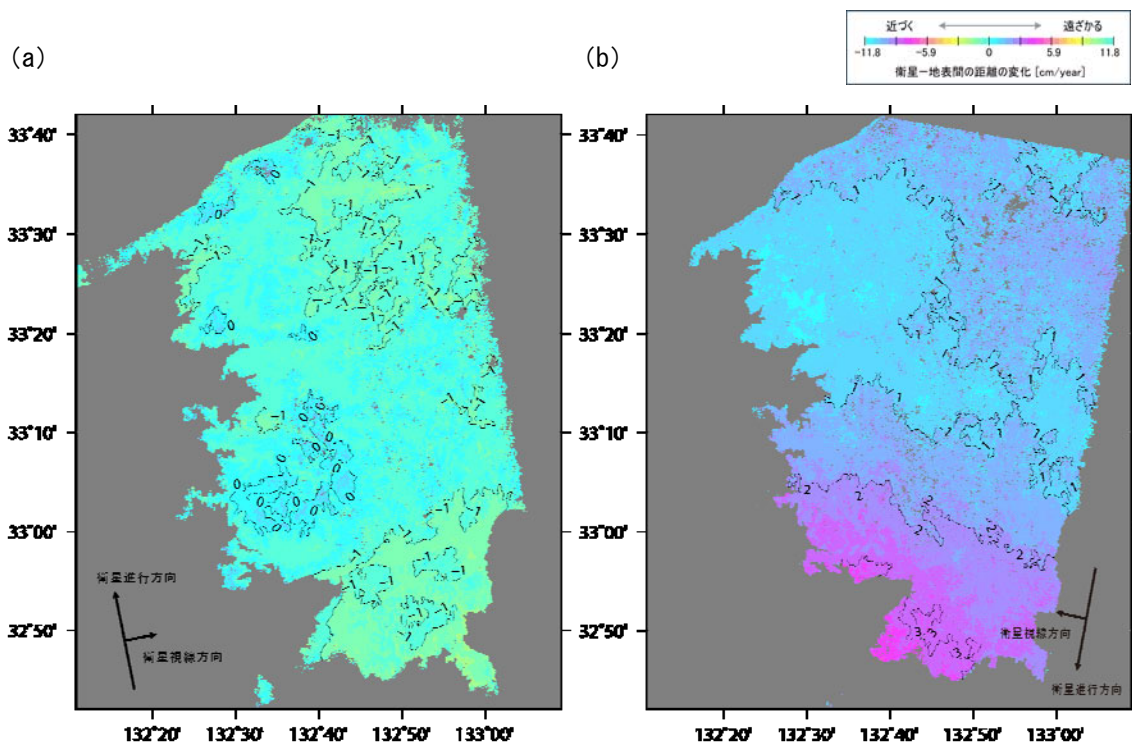


図-6 スタッキングにより得られた定期的な変動速度分布 (a) Ascending (b) Descending

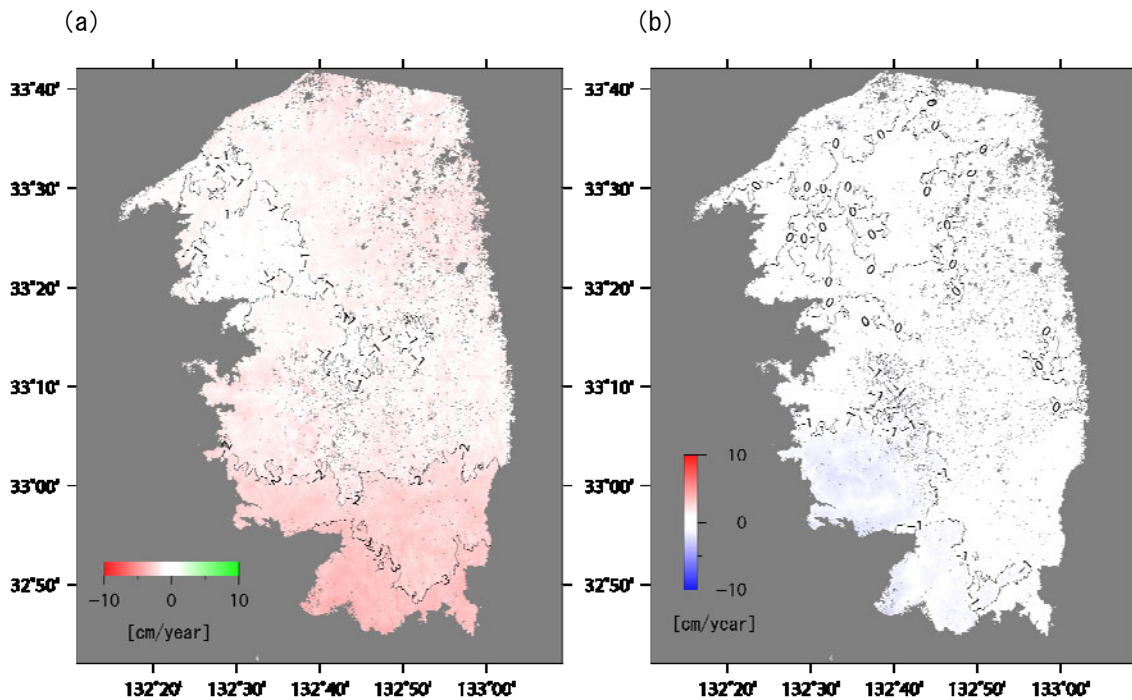


図-7 定常変動の2次元解析結果 (a) 東西成分 (b) 上下成分

2.3 「定常変動」+「非定常変動」の検出

スロースリップ期間 (2009 年秋頃～2010 年末頃) をより長く含んだものを、非定常変動を抽出するための「非定常ペア」とする。そこで、スレーブには 2010/10/29 (Ascending), 2010/10/13 (Descending) の観測データを使用し、マスターには基線長垂直成分 (Bperp) が短く、ノイズが少ないものを選ぶこととした。上記の条件に基づき、2008/03/07 の観測データを Ascending のマスターとした。Descending については、上記の条件を満たしても、スロースリップ開始以前の観測データをマスターとすると干渉不良の結果が多かったため、スロースリップ期間を2つ (2010/01/10-2010/05/28 と 2010/05/28-2010/10/13) に分けた解析結果を合成したものを使用することとした (表-2, 図-8)。

表-2 非定常ペア

衛星進行方向	マスター	スレーブ
北行 (Ascending)	2008/03/07	2010/10/29
南行 (Descending)	2010/01/10	2010/10/13
	2010/01/10	2010/05/28
	2010/05/28	2010/10/13

合成

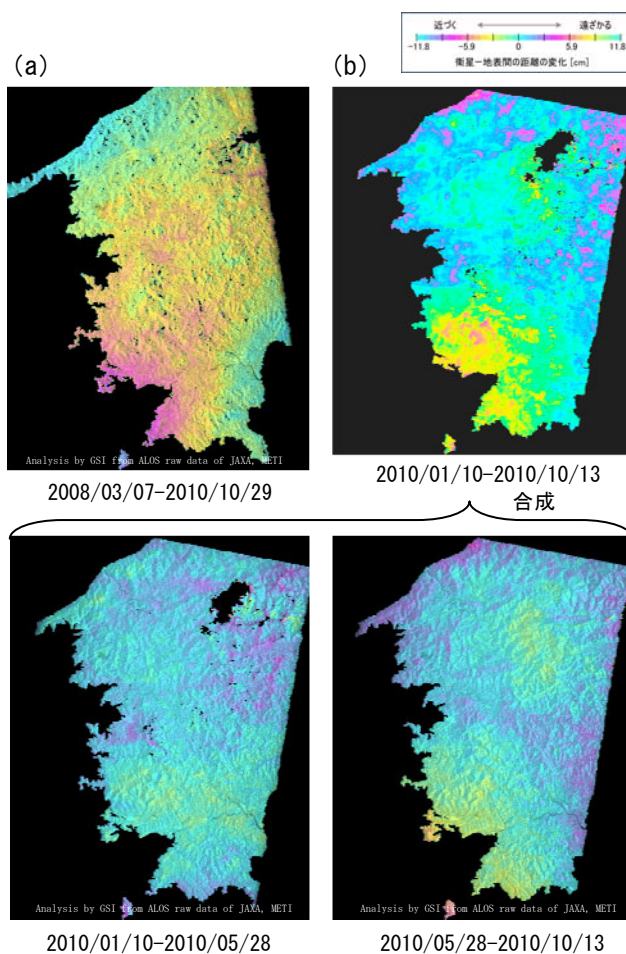


図-8 非定常ペア (アンラップ画像)
(a) Ascending (b) Descending

2. 4 「非定常変動」の抽出

2. 3の「非定常ペア」から2. 2の「定常変動」を差し引き、Ascending については 2009 年秋頃～2010 年 10 月 29 日の、Descending については 2010 年 1 月 10 日～10 月 13 日の非定常変動を抽出した(図-9)。

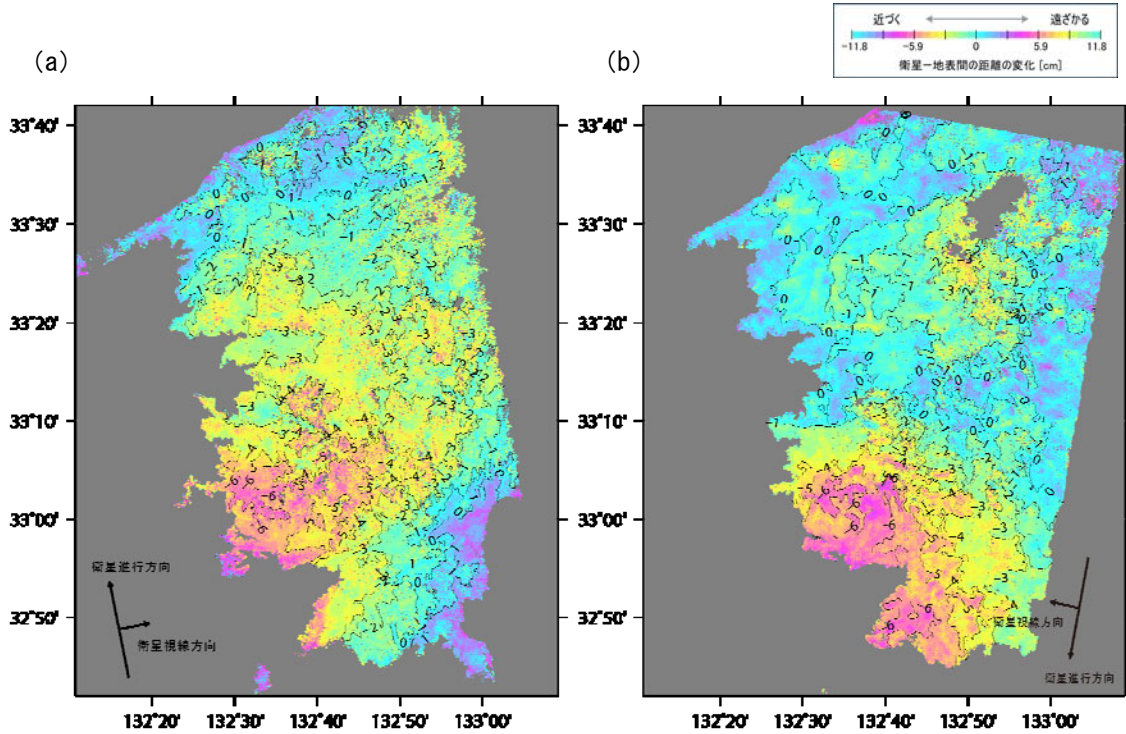


図-9 抽出された非定常変動 (a) Ascending (b) Descending

Descending では、宿毛市を中心として衛星に近づく方向(東向き/隆起)の変動が明瞭である。Ascending では Descending と同程度の変動量があるが、スロースリップとは逆の、衛星へ近づく方向(西向き/隆起)の変動が抽出されてしまっている。これは、Ascending では定常変動が明瞭でないにもかかわらず、非定常ペアとして選択した画像に何らかのノイズに起因した見かけの変動が含まれているためと思われる。

また Hi-net 観測点での傾斜変動および GEONET での水平変動から推定された断層モデル(防災科学技術研究所, 2010)を用いて作成した SAR 干渉解析結果のシミュレーション(図-10)と照らし合わせると、Descending については、変動地域・変動量ともによく一致している。

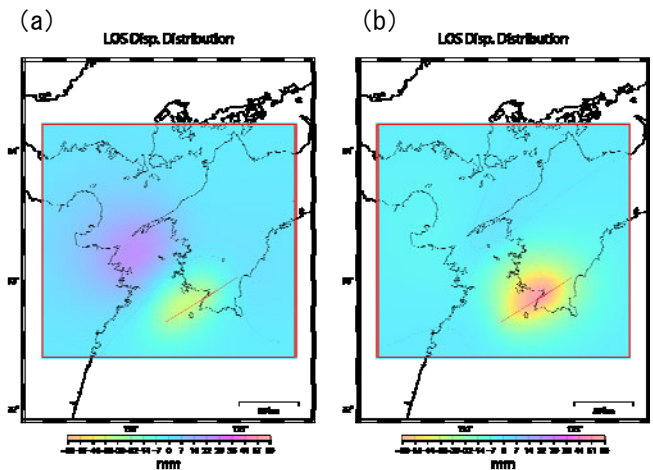


図-10 防災科学技術研究所(2010)の断層モデルから計算される位相変化量(2009.8~2010.10のデータを使用)
(a) Ascending (b) Descending

2. 5 「非正常変動」の2.5次元解析

2. 4の結果を用いて2.5次元解析を行い、非正常変動の東西方向及び上下方向の空間分布を求めた(図-11)。

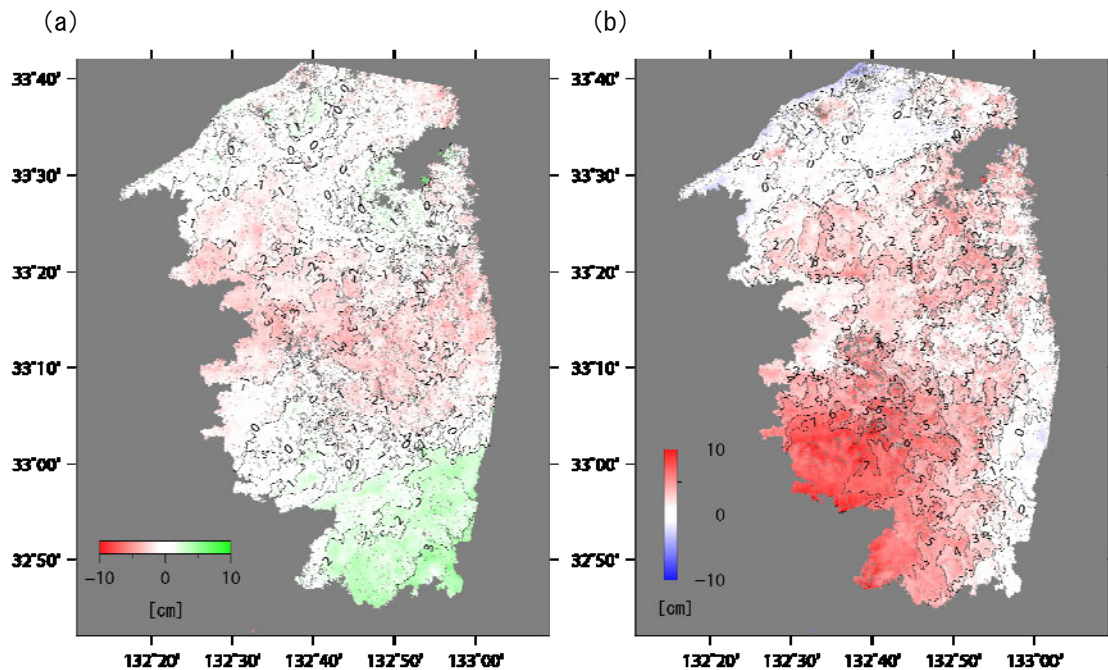


図-11 非正常変動の2.5次元解析結果 (a) 東西成分 (b) 上下成分

足摺岬から北方の豊後水道に面した海岸線にかけて3 cm程度の東向きの変位, 6~7 cmの隆起が明瞭に捉えられている。

また防災科学技術研究所(2010)の断層モデルから計算される変位量(図-12)及びGEONETの観測結果(図-1)と照らし合わせると, 上下成分の変動地域はよく一致している。変動量については, 東西成分では概ね一致しているが, 上下成分ではSAR干渉解析結果の方が2 cmほど大きく出ている。これは「定常変動」+「非正常変動」検出(2. 3)でのノイズの影響が大きく影響しているものと思われる。この「定常変動」+「非正常変動」検出の結果が, スタッキング等でノイズが軽減できれば, もう少し調和的な結果になるであろう。

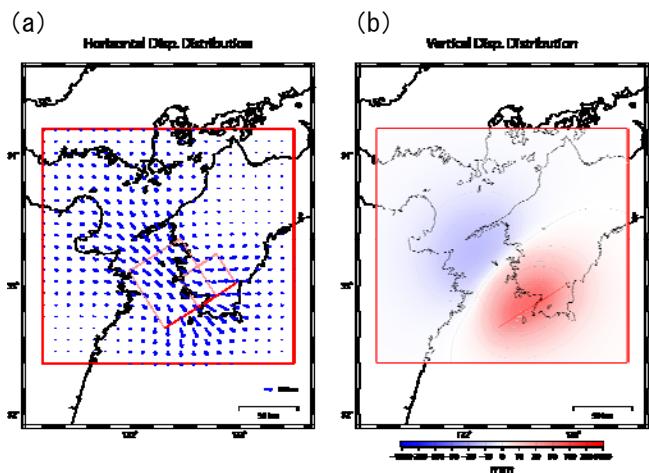


図-12 防災科学技術研究所(2010)の断層モデルから計算される変位量(2009. 8~2010. 10のデータを使用)
(a) 水平成分 (b) 上下成分

4. まとめと今後の課題

豊後水道周辺を対象として「だいち」PALSAR データの干渉処理を行い、定常的な地殻変動を除去することで、この地域で発生したスロースリップによる非定常的な地殻変動を抽出することができた。また Ascending, Descending の両方向のデータを利用した 2.5 次元解析により東西、上下方向の変動を求めた。

ただし本稿においては、非定常変動の抽出するための基本となった「定常変動」+「非定常変動」を含む解析結果は、Ascending で 1 ペア、Descending で 2 ペアの合成のみで行ったため、定常変動のようにノイズを低減することは困難であった。よって、スロースリップ期間を全て含む非定常ペアを複数解

析し、スタッキングすることで、低ノイズの非定常変動を得ることができると考えられるため、今後スロースリップ期間を全て含む観測データが溜まり次第、実施する予定である。

謝 辞

ここで使用した「だいち」の PALSAR データの所有権は、宇宙航空研究開発機構及び経済産業省にあります。また、これらのデータは、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。この場を借りて、御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 国土地理院ホームページ, <http://www.gsi.go.jp/kenkyukanri/kenkyukanri60004.html> (accessed 1 Feb, 2011)
- 飛田幹男・宗包浩志・松坂 茂・加藤 敏・矢来博司・村上 亮・藤原 智・中川弘之・小澤 拓 (2005) : 干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究, 国土地理院時報, 106, 37-49, <http://www.gsi.go.jp/common/000024818.pdf> (accessed 1 Feb. 2011)
- Fujiwara, S., T. Nishimura, M. Murakami, H. Nakagawa and M. Tobita (2000) : 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 27, 2049-2052.
- Ozawa, S., H. Suito, T. Imakiire and M. Murakami (2007) : Spatiotemporal evolution of aseismic interplate slip between 1996 and 1998 and between 2002 and 2004, in Bungo channel, southwest Japan, *J. Geophys. Res.*, 112, B05409, doi:10.1029/2006JB004643.
- 防災科学技術研究所 (2010) : 豊後水道長期的スロースリップイベント (2009 年-2010 年), 第 215 回地震調査委員会資料.