

ALOS-PALSAR 画像を用いた 2010 年バハ・カリフォルニア地震による 地殻変動量の検出

リュウ・ウェン¹⁾、松岡昌志²⁾、山崎文雄³⁾

1) 千葉大学大学院工学研究科、助教 博(工)
e-mail : wen.liu@chiba-u.jp

2) 東京工業大学大学院総合理工学研究科、准教授 博(工)
e-mail : matsuoka.m.ab@m.titech.ac.jp

3) 千葉大学大学院工学研究科、教授 工博
e-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

要 約

2010年4月4日にメキシコ北部のバハ・カリフォルニア州(Baja California, Mexico)で M_w 7.2の地震が発生した。この地震はラグナサラダ(Laguna Salada)断層の活動によるもので、断層を中心に広域の地殻変動が観測された。本研究では、地震前後に撮影されたALOS-PALSAR画像の差分干渉処理によって断層付近の地殻変動量の検出を行った。その結果、画像全体による位相のアンラップ処理で得られた地殻変動量は、平均化ウィンドウを用いたことで低い結果となった。そこで、6つの断面における位相を直接に繋いで断層周辺の変動量を推定した。また、ALOS-PRISM画像から得られた変動量と地震波形から求められたセントロイド・モーメント・テンソル(CMT)解の断層モデルから算出された変動量を用いて、結果の比較と検証を行った。

キーワード： 合成開口レーダ画像、差分干渉処理、アンラップ処理、断層モデル

1. はじめに

2010年4月4日にメキシコ北部のバハ・カリフォルニア州(Baja California, Mexico)で M_w 7.2の地震が発生した。地震の発生時刻は現地時間の午後3時40分である。震源の位置は 32.26° N, 115.29° Wで、深さは10 kmである¹⁾。この地震は1892年に M_w 7.2の地震を引き起こしたラグナサラダ(Laguna Salada)断層によるものと考えられる。震源が浅いため、断層を中心に強い揺れが広がり、アメリカ国境付近のMexicali市とCalixico市が最も大きい被害を受けた。建物の損害や、電力・水道などのライフラインの中断によって、2万5千人以上が地震の影響を受けた。また、200人以上の負傷者が出た。断層の東南側にある農地では広域の液状化現象が発生した。また、本震とその後続く余震によって広域の地殻変動が発生し、アメリカ国内のGPS観測点で20cm以上の水平変動が観測された。

地殻変動量の把握することは地震メカニズムの解明や災害の緊急対応、今後発生しうる地震の予測に繋がる。日本国内では国土地理院が全国に約1,300ヶ所のGPS電子基準点が設置したため、地震が発生し

た際に迅速かつ正確な地殻変動量が得られる²⁾。しかし、電子基準点が設置されていない発展途上国は数多く存在する。バハ・カリフォルニア州では震源から遠く離れた南側に1つの観測点しかなかった。また、地震の波形から永久変位を求めることで、地殻変動量を推定できる³⁾⁴⁾。しかし、こちらの手法でも地震計が設置された場所における点の変動量しか得られない。地震のメカニズムを解明するためには、面的に地殻変動の特性を把握できる衛星画像の利用が有効である。

衛星画像を用いた変動量を検出する手法は主に2つに分けられる。一つは合成開口レーダ(SAR)画像の位相情報を用いた干渉処理である。Massonnet et al.⁵⁾が1992年米国ランダース地震の地殻変動を、ERS-1衛星のSAR観測データを用いた干渉解析で検出できたことから、干渉SARが地表変動の観測手法として注目されるようになった。2011年の東北地方太平洋沖地震では複数のEnvisat-ASAR画像とALOS-PALSAR画像の干渉処理により広域の変動量が求められた⁶⁾。しかし、地表面の激しい変化による位相の不干渉や衛星の軌道条件によって、干渉SARを適用しにくい場合もある。二つめの手法は、2時期の画像間の画素ずれを計測することで変動量を求めるピクセルオフセット法である。この手法では、まず2つの画像間の位置ずれ(オフセット)を求め、これから画像全体にわたる位置ずれ成分を取り除き、局所的な画素のずれを変動量として検出する方法である。Michel et al.⁷⁾はSAR強度画像にこの方法を適用し、1992年ランダース地震での地殻変動検出に成功した。飛田らは高精度マッチング手法を提案し⁸⁾、RadarsatとEnvisat衛星画像から地殻変動を検出した⁹⁾。ピクセルオフセット法は、SAR画像だけではなく光学画像にも有効である。Matsuoka & Kodama¹⁰⁾は地震前後のTerra-ASTER画像とPRISM画像それぞれのオルソ画像を用いて、本研究の対象であるバハ・カリフォルニア地震による地殻変動量の検出を行った。

本研究では、地震前後のALOS-PALSAR画像を用いて差分干渉処理で地殻変動量の検出を行った。2時期の画像における位相差を求め、位相のアンラップによって地殻変動量を検出する。アンラップ処理は2つの方法で行った。ひとつめは基準点を設定し、画像全体の位相をウィンドウで平均しながら繋ぐ方法である。もうひとつは断層と直交した断面に沿って、断層断面の両端側から断層中心に向かって位相を繋いで変動量を求める方法である。さらに、得られた断層付近の変動量を検証するため、Matsuoka & KodamaがALOS-PRISM画像から検出された結果や地震波形から推定された断層モデルを用いて計算される永久変位量と比較した。

2. 対象地域と画像データ

本研究の対象地域は図1に示すアメリカ・カリフォルニア州の一部と震源地を含むラグナサラダ断層の周辺である。対象地域内ではCRTN (the California Real-Time Network)が設置した3つのGPS観測点がある。3つの観測点からともに東南方向の水平変動が観測された¹¹⁾。そのうち、観測点「P496」で観測された水平変動量が最も大きく、20cmほどであった。しかし、これらの観測点は断層の近くではなく、カリフォルニア州に分布するため、断層活動の全貌を把握することが困難である。そこで、衛星画像を用いた面的な地殻変動把握が断層モデルの推定に有効である。

地震前の画像は2009年12月17日、地震後の画像は2010年5月4日に撮影されたものを使用した。画像の撮影範囲を図1の赤枠で示す。2つの画像ともに上昇軌道から高分解能モードで撮影されたものである。画像中心における観測角度が38.6°で、進行方向が北から時計回りの350.4°である。地震前の画像がHH偏波のみのFBS (Fine Beam Single)モードで、地震後の画像はHHとHVの2偏波のFBD (Fine Beam Dual)モードで撮影された。画像データはスラントレンジで記録された信号データであり、画像化されていないレベル1.0のプロダクトである。そのため、処理ソフトENVI/SARscapeを用いて、画像化処理を行った。

レンジ圧縮とアジマス圧縮後、位相と振幅情報の両方を含む複素数データ(SLC)が得られる。アジマス方向における1ルックの解像度が地震前後ともに3.1mである。レンジ方向の解像度は地震前が4.7mで、地震後が9.4mである。地震後は2偏波の画像のため、地震前のものより解像度は劣る。アジマス方向に4ルックのマルチルック処理を行った後、アジマス方向の解像度は12.4mになった。マルチルック処理後の振幅画像を図2に示す。データは左上から横にレンジ方向、縦にアジマス方向を記録するため、北と南が反転したような画像になっている。これらの画像を用いて差分干渉処理による地殻変動の検出を行う。

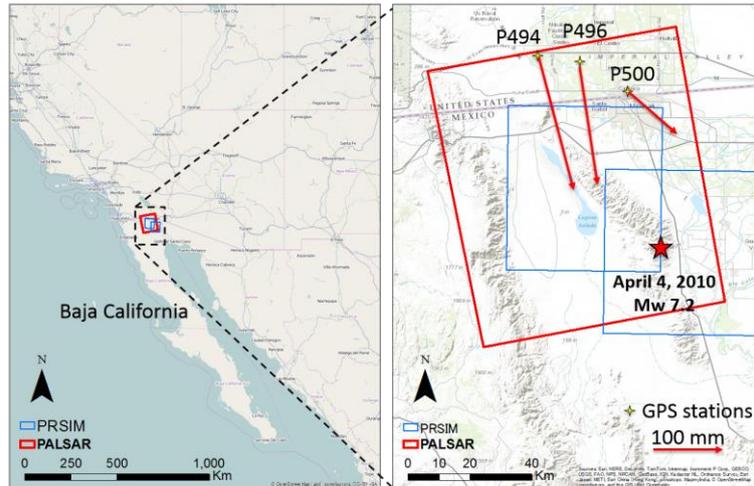
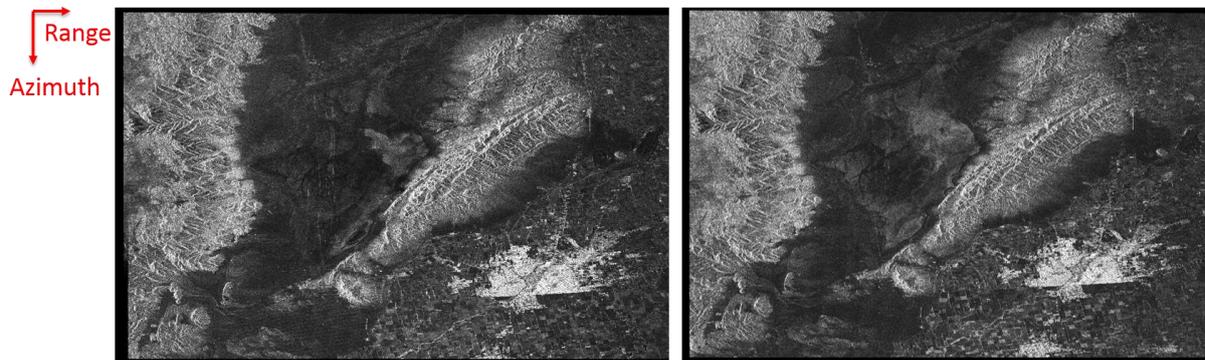
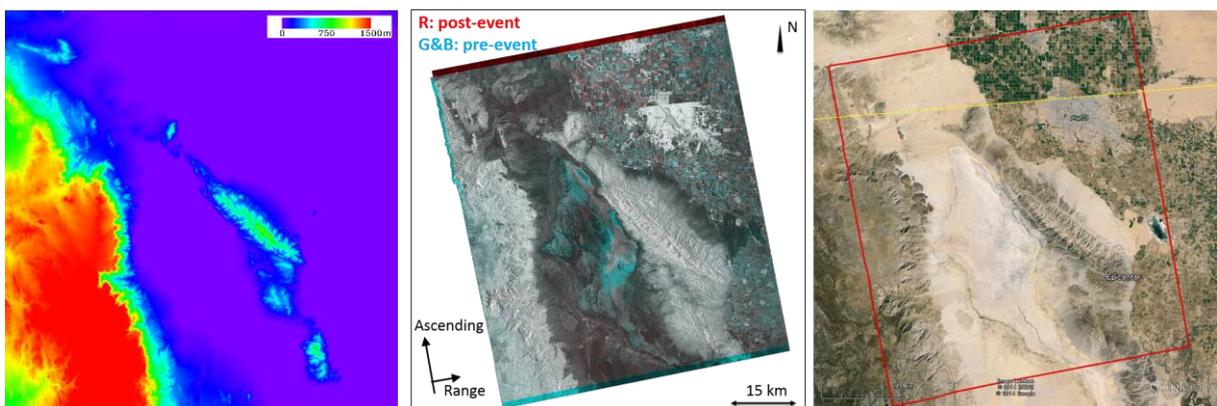


図1 対象地域は2010年メキシコ・バハカリフォルニア地震の震源地を含むラグナサラダ断層の周辺である。赤枠は使用するALOS-PALSAR画像の撮影範囲であり、青枠はMatsuoka & Kodama¹⁰⁾が使用したALOS-PRISM画像の撮影範囲。3つのGPS観測点で観測された水平変動量をベクトルで表示。



(a) 2009年12月17日(地震前) (b) 2010年5月4日(地震後)
図2 マルチルック処理後の地震前後のPALSARのスラントレンジ強度画像



(a) 数値標高モデル (b) カラー合成 SAR 強度画像 (c) 2013年4月10日の光学画像
図3 90-m 解像度の SRTM 数値標高モデル(a)を用いて地図投影した地震前後のカラー合成 SAR 強度画像 (b)と2013年4月10日に撮影された光学画像(Google Earthより)

図3(a)に示す90m解像度のSRTM数値標高モデルを用いて、図2に示す振幅画像を地図投影し、輝度補正したカラー合成図を図3(b)に示す。図3(a)に示すように対象地域の西側は標高1500mほどの高地であり、中央のラグナサラダ断層の山脈が標高700mで、その周辺がほぼ平地である。比較的起伏が大きい地域である。図3(b)に示す地震前後のカラー合成SAR画像と(c)に示すGoogle Earthから得られた2013年4月10日の光学画像を比較すると、地震前後の反射強度が変化した地域は断層の西側にある水域と東側の農地である。断層付近の地表面については地震前後で明確な変化が見られなかった。

3. 差分干渉処理

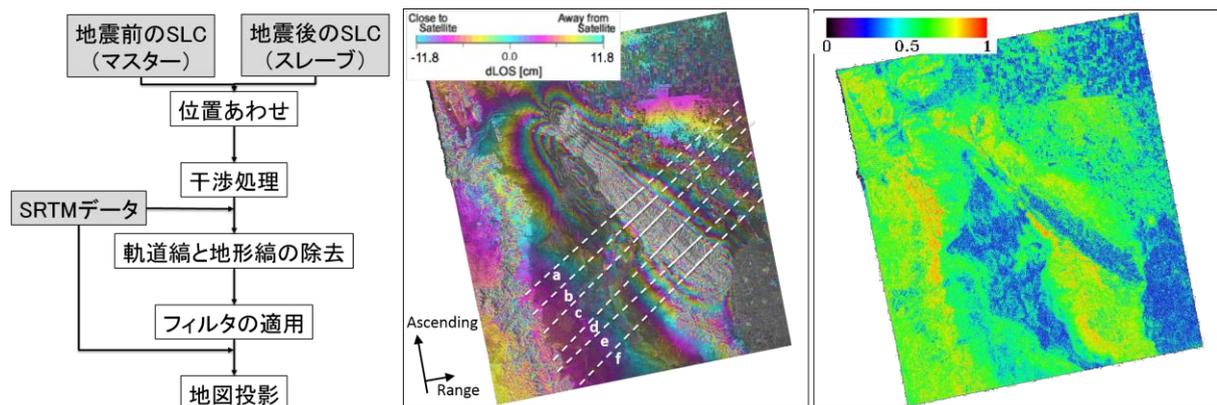
干渉処理はマイクロ波の位相差を利用して距離を測定する技術である。数値標高モデルの作成や地殻変動の検出によく用いられる。位相を利用するため、画像の地上分解度に関係なく高精度の結果が得られる。標高の変化を求める場合、 $-\pi$ から π までの1周期の位相変化で表す標高差は画像間の軌道距離に依存する。軌道間距離が長いほど、高い精度の標高が得られるが、長すぎると干渉することが難しくなる。一方、地殻変動を求める場合、1周期の位相変化がマイクロ波の波長の半分になる。本研究に用いた2枚の画像の垂直軌道間距離は682mであり、標高を求めようとする場合には、1周期の位相差は94mを表す。既存の標高から得られる位相との差分によって計算される地殻変動については、L-band（波長23.6cm）のPALSARを使用する場合、1周期の位相差は11.8cmを表す。

差分干渉処理は3枚以上のSARデータ、または2枚のSARデータと標高モデルを用いて、地震による地盤変動や沈下、火山活動などによる地表面の変化を観測する手法である。本研究では地震前後のPALSARデータと図3(a)に示すSRTM数値標高モデルを使用した。差分干渉処理の流れは図4(a)に示す。まず、図2に示す2時期の強度画像を用いて、サブピクセルレベルでの位置合わせを行った。地震前のデータをマスターとし、地震後のデータをスレーブとする。位置合わせ後に、位相差を求めて初期干渉画像を作成した。初期干渉画像には、衛星の位置の違いに起因した軌道縞、標高による地形縞、地殻変動による変動縞と大気の影響などによるノイズを含めている。軌道縞は入射角の情報をもとに除去し、標高縞は標高モデルを用いて除去した。本研究に用いた画像の軌道間距離が短いため、低解像度の標高モデルの誤差による標高縞の影響が少ない。さらに、Goldsteinフィルタ¹²⁾を用いて干渉縞におけるノイズを減少し、変動縞のみの画像が得られた。標高モデルを用いて地図投影した変動縞の画像を図4(b)に示す。図に示したように、ラグナサラダ断層を中心に、両側で大きな地殻変動が発生した。また、変動縞が画像全体に広がり、広域で変動が発生したことを示す。変動縞を得ると同時に、地震前後画像間の位相の相関性を表すコヒーレンスを式(1)によって計算し、その結果を図4(c)に示す。

$$\gamma = \frac{|(x_1 x_2^*)|}{\sqrt{|x_1|^2 |x_2|^2}} \quad (1)$$

ここで、 x_1 と x_2 はSAR画像の複素数値で、*は共役複素数を表す。記号<>はウィンドウ内の期待値を意味し、||は絶対値を示す。

式(1)に示すように、コヒーレンスの計算はウィンドウを用いて行う。本研究では3×3ピクセルの最も小さいウィンドウを使用した。コヒーレンスは干渉データの品質と位相精度を表す指標としてよく利用される¹³⁾。用いた画像の軌道間より短いため、画像全体に0.5以上の高いコヒーレンスが得られ、それは干渉性が高いことを示す。図4(c)から、地震前後に強度が変化した西側の水域と東側の農地においてはコヒーレンスが低いことがわかる。これは水面や植物による季節変化に伴う干渉性の低下と考えられる。また、断層の南東側はコヒーレンスが低い地域が広がっており、液状化が発生した地域と考えられる。図3(b)のカラー合成強度画像から大きい変化が見られなかったラグナサラダ断層近傍についても低いコヒーレンスを示す。この低下は、地震によって断層が地表に出現し、地表面が乱れたことが原因と考えられる。図4(b)に示す変動縞と比較すると、コヒーレンスが0.5以上の高い地域では明確な変動縞が得られたが、低い地域では位相が乱れたために変動縞が得られていない。また、西側の高地で高いコヒーレンスを示すものの、平地との境界では位相縞が乱れている。標高が激しく変化する地域では、90mのSRTMデータでは地形縞を完全に除去できなかった可能性がある。



(a) 差分干渉処理のフロー (b) 変動縞 (c) コヒーレンス
 図4 差分干渉処理(a)を用いて得られた変動縞図(b)とコヒーレンス図(c) ; (b)の白い点線が断層と直交した6つの断面の位置を示す。

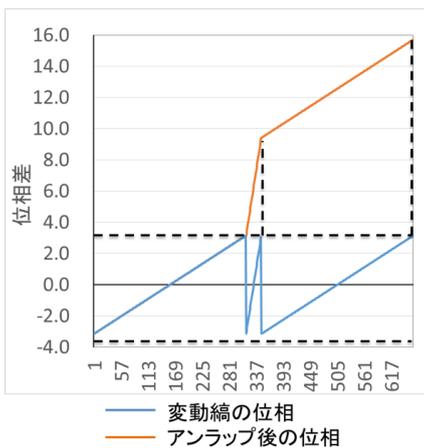
4. 地殻変動量の検出

差分干渉処理で得られた変動縞は $-\pi \sim \pi$ の値を繰り返す不連続な縞である。それらの不連続縞を図5(a)のように連続的に位相を繋ぐことがアンラップ処理である。アンラップ処理後の位相から実際の変動量が求められる。

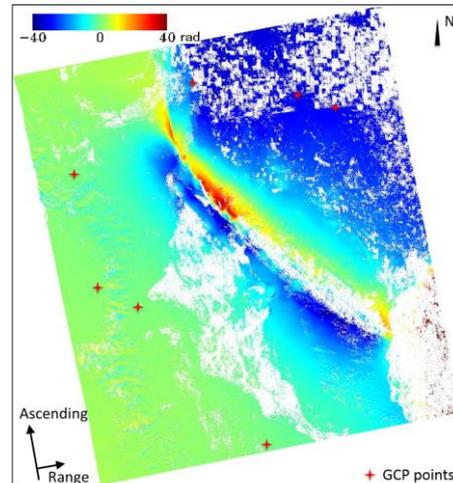
本研究では対象地域内の変動量を検出するため、画像全体についてコヒーレンスが0.25以上の地域を対象にアンラップ処理を行った。コヒーレンスの低い地域があるため、手法にはMinimum Cost Flow法を用いた¹⁴⁾。この手法は正方形のウィンドウを用いて位相の平滑化を行いながら繋いでいく方法である。その結果、図5(b)に示すような滑らかな変動位相量が得られた。得られた位相量は -45 ラジアンから 95 ラジアンである。断層の両側遠方にいくに従い逆方向の変動が発生したため、とくに断層の北東部では位相が正確に繋がらなかった可能性がある。また、衛星軌道の違いに起因して画像全体に傾きが生じている。南西側の位相がほぼ0なのに対し、北東側の平地が -40 ラジアンである。ここで、プラスの位相が衛星観測方向から遠ざかることを示し、マイナスの位相は近づくことを示す。画像の歪みを補正するため、グランド・コントロール・ポイント(GCP)を設定した。通常、GPS観測点がGCPとしてよく用いるが、対象地域内では北側のアメリカ国内にのみ観測点があるため、7つのGCPを断層から一定の距離を離れ、かつ位相縞が比較的安定した場所から均一に選定した(図5(b)参照)。設置したGCP点における変動量が不明のため、不動点と見なして画像の補正を行った。

補正後、GCP点に対する相対位相差から変動量を求め、画像全体の変動量を図6(a)に示す。断層の東西で均一にGCPを設置したため、両側の基準点周辺がほぼ0に補正された。断層の東側では衛星から遠ざかり、最大1.5mほど北東方向への水平変動または沈下が検出された。一方、西側では衛星方向へ近づき、最大0.5mほど南西方向への水平移動または隆起が得られた。図6(a)にある6つの断面における変動量を図7のグラフの「PALSAR_1」で示す。断面aからcまででは断層の西側で明瞭な変動が検出できなかった。断面dからfまでは西側の変動量が衛星方向へ0.2m前後であった。一方、断層aからcまでの東側で衛星方向から平均0.3m以上の遠ざかりが検出され、断面dからfまでが0.2mほどであった。各断面について断層の東西における衛星視線方向の変動量の平均値を表1に示す。ウィンドウを用いてアンラップしたため、得られた変動量が平均化され、断層近傍の変動が明確ではなかった。

そこで、6つの断面における位相を断面方向に繋いで変動量の推定を行った。図4(b)に示す6本の点線における位相量を取り出し、断層線から最も離れた(中心から約30kmほど)両側の点を変動なしと見なす。断面に沿って、隣接するピクセルの位相差を求めた。隣のピクセルとの位相差が ± 4.5 ラジアン以上変化した場合、位相が1周期を越えたと考えて、アンラップさせる。位相のアンラップ処理は両側の不動点から断層線に向かってそれぞれで行い、断層線で終了する。そして、アンラップ後の位相を実際の

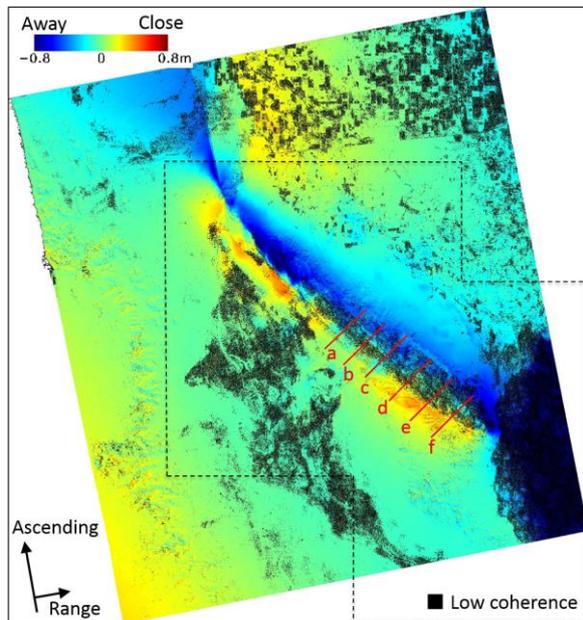


(a) アンラップ処理の概念図

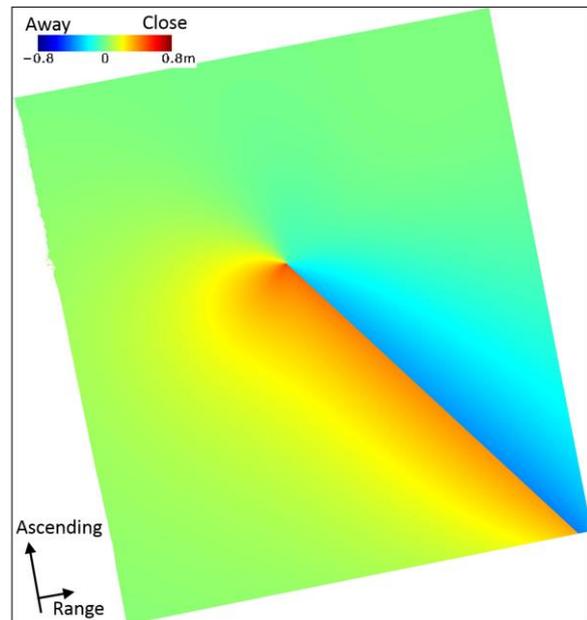


(b) 位相差

図5 位相のアンラップ処理の概念図(a)とアンラップ処理後得られた連続的な位相差(b) ; 7つの星印が設置したグランド・コントロール・ポイント(GCP)である。



(a) PALSAR 画像からの変動量

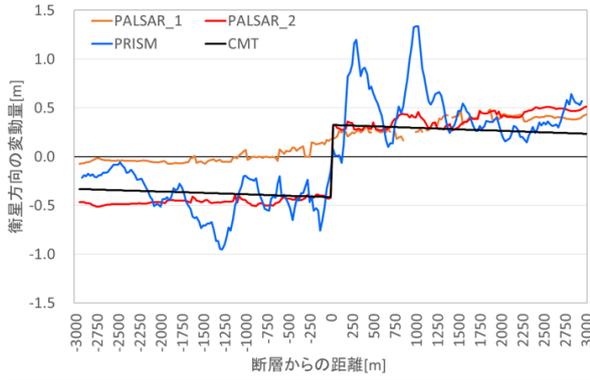


(b) 断層モデルからの変動量

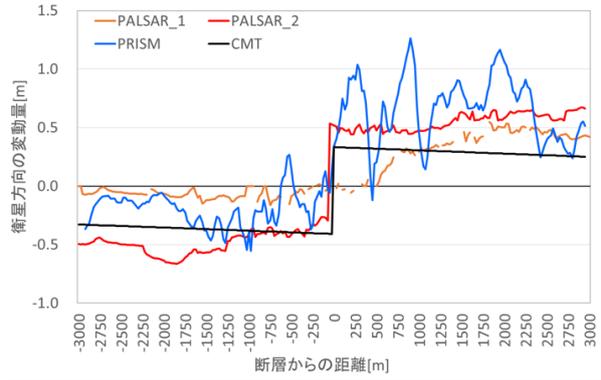
図6 画像全体のアンラップ処理で得られた GCP 基準点に対する相対変動量(a)と本震のセントロイド・モーメント・テンソル(CMT)解で得られた断層モデルから推定された衛星方向の変動量(b) ; (a)の点線枠が Matsuoka & Kodama¹⁰⁾が使用した PRISM 画像の輪郭である。

変動量に変換した。なお、断面cからfまでの東側では画像の撮影範囲によって開始点が断層線からの距離が30km未満である。図4(b)に示す変動縞がほぼ断層線に平行することから、断面aからbにおいて断層線から同じ距離の点の変動量を断面cからfまでの開始点における変動量に連続していると仮定し、断面cからfまでの変動量を修正した。

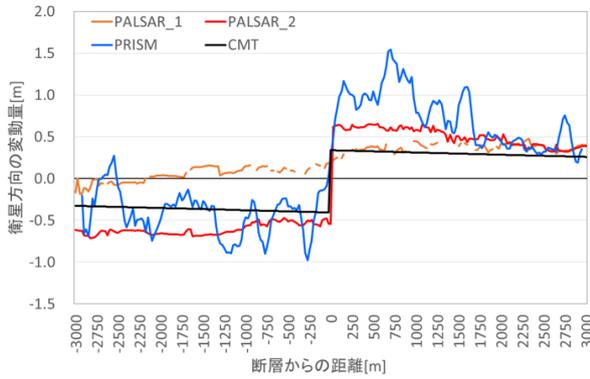
図6(a)に示す6つの断面の変動量を図7中に「PALSAR_2」で示す。画像全体でアンラップした「PALSAR_1」と比べて、断面に沿って位相をアンラップした「PALSAR_2」の方が変動量が多い。断層の西側では、断面aからdまでにおける変動量は衛星に向かう方向に0.5mほどであり、断面eからfま



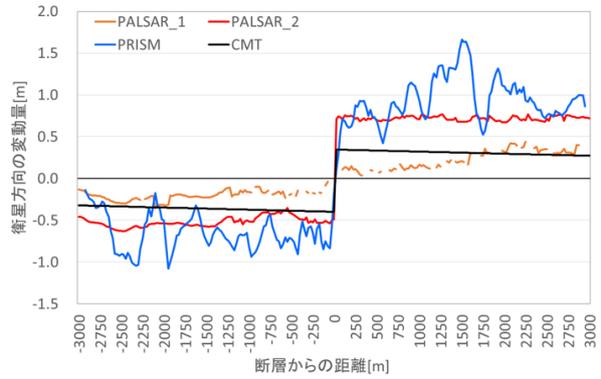
(a) 断面 a



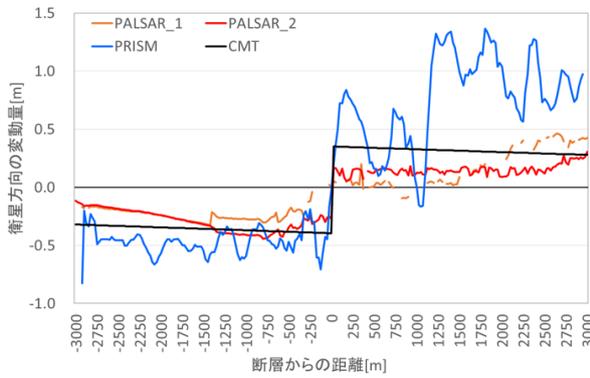
(b) 断面 b



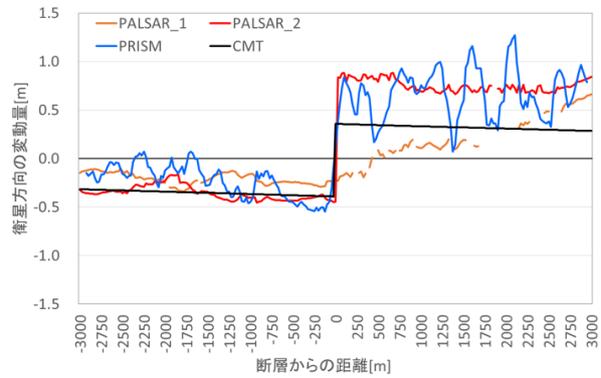
(c) 断面 c



(d) 断面 d



(e) 断面 e



(f) 断面 f

図7 PALSAR 画像全体のアンラップ処理で得られた変動量 (PALSAR_1) と、断層と直交方向に位相を繋ぐことで得られた変動量 (PALSAR_2) の6つの断面における比較；青線はPRISM画像から得た変動量 (PRISM)¹⁰⁾、黒線は断層モデルから推定した変動量 (CMT) を示す。

表1 図7に示す6つの断層断面で得られた断層の東西それぞれの側における衛星視線方向の変動量の平均値 [m]

	a		b		c		d		e		f	
	西側	東側										
PALSAR_1	-0.01	0.35	-0.07	0.35	0.05	0.37	-0.20	0.23	-0.23	0.16	-0.21	0.20
PALSAR_2	-0.46	0.39	-0.48	0.55	-0.61	0.50	-0.52	0.72	-0.29	0.15	-0.36	0.75
PRISM	-0.40	0.47	-0.18	0.67	-0.40	0.72	-0.64	0.95	-0.47	0.77	-0.23	0.67
CMT	-0.37	0.28	-0.37	0.29	-0.37	0.29	-0.36	0.30	-0.36	0.30	-0.35	0.31

で0.3mほどであった。東側では、断面aからcまでにおける変動量は衛星と逆方向へ平均0.5mで、断面dとfが0.7m以上、断面eが最も小さく0.15mほどであった。また、断層の両側からそれぞれ位相をアンラップしているため、断層線が明瞭になった。各断面での得られた変動量の平均値を表1に示す。

5. 結果の比較と検証

本研究のPALSAR画像から得られた変動量を検証するために、Matsuoka & Kodama¹⁰⁾が地震前後のPRISMオルソ画像から得た変動量および地震波形から推定された断層モデルにおける変動量との比較を行った。

5.1 PRISM画像の結果との比較

Matsuoka & Kodama¹⁰⁾は地震前後のPRISM画像から、ピクセルオフセット法を用いて東西と南北方向における2次元の変動量を求めている。SAR画像の差分干渉法では衛星方向における1次元の変動量しか得られないため、PRISM画像で得た結果を衛星視線方向へ変換する必要がある。実際に発生する3次元の変動量と干渉法で得られる衛星視線方向の変動量の関係が式(2)で表す。

$$M_s = (-D_E \sin \alpha + D_N \cos \alpha) \sin \theta + D_Z \cos \theta \quad (2)$$

ここで、 M_s が衛星視線方向における変動量で、 D_E, D_N, D_Z がそれぞれ東西、南北と垂直における変動量である； α は衛星の進行角度(北から時計周り)であり、 θ は観測角度である。

PRISMオルソ画像のピクセルオフセット法では水平の変動量しか得られないため、東西と南北の変動量を式(2)に代入し、衛星視線方向の変動量を求めた。また、衛星の進行角度と観測角度が画像における位置によって異なり、PALSAR画像の撮影情報から各ピクセルでの角度を求めて式(2)に代入した。PRISM画像のピクセルサイズが2.5mで、地図投影した15m/pixelのPALSAR画像の1/6である。そこで、式(2)で得られた結果を6ピクセルずつ平均化した。図6(a)に示す6つの断面におけるPRISM画像の結果を図7のグラフの「PRISM」で示す。また、断層線の東西側それぞれの変動量の平均値を表1に示す。

ピクセルオフセット法で得られた結果は、画像の輪郭を不動点とした相対変動量とみなすことができる。使用したPRISM画像の輪郭を図6(a)の黒い点線で示す。PRISM画像の輪郭が、PALSAR画像の補正時に使用したGCPや断面で位相を繋ぐ時の不動点と比較して、断層線からの距離がほぼ同じ程度離れている。そのため、PALSAR画像とPRISM画像から得られた相対変動量を比較することはできる。

6ピクセルずつ平均化しても、PRISM画像の結果は大きく変動する。これは、PRISM画像のピクセルのサイズが2.5mと比較的粗いために、サブピクセルレベルで位置合わせを行っているものの、検出分解能が低いために位置合わせ誤差が生じているものと考えられる。PALSAR画像のアンラップ処理で得られた変動量(PALSAR_1)はPRISM画像の結果(PRISM)と比較して、全体的に小さい傾向にある。これは、断層付近の干渉性の低下と位相の平均化が原因と考えられる。一方、位相を繋いで得られた変動量(PALSAR_2)は、断面e以外でPRISM画像の結果と近い。しかし、断層付近では干渉性の低下によって、PRISM画像の結果より小さい変動量になった。

PRISM画像のピクセルオフセット法で得られた変動量を標準とした場合、PALSAR_1で示した断層断面の平均変動量(表1)のRMS誤差は0.41mで、PALSAR_2は0.24mであった。PRISM画像からは水平方向の変動しか得られていないため、PALSAR衛星で観測された衛星視線方向との変動量と直接的な比較はできない。現地調査によると、地震により断層の東側が沈下し、西側が隆起している。そのため、東側ではPRISM画像の結果より大きく遠ざかり、西側ではさらに衛星方向へ近づくと考えられる。PRISM画像の結果よりやや変動量が大きいPALSAR_2の結果がPALSAR_1より妥当と考えられる。

5.2 地震断層モデルによる変位との比較

地震波形の解析で得られた断層モデルから地表の変動量を推定できる。本研究では、本震のセントロイド・モーメント・テンソル(CMT)解¹⁵⁾の断層パラメータを用いて地殻変動を推定した。CMT解析で走向が221°と312°の2つの断層面が得られているが、PALSAR画像から得られた位相縞を参照し、走向が

312°の断層面を選択した。傾斜角とすべり角がそれぞれ84°と-6°である。また、CMT解析で得られたセントロイド位置がPALSAR画像から想定される断層の位置と多少のずれがあるため、PALSAR画像の断層面に合わせて断層モデルを移動した。作成された断層面の長さは約66kmで、幅が20kmであった。

断層モデルに基づき、地表面における東西、南北と垂直の3次元の変動量を推定した。断層の東側が東南方向へ移動し、最大0.55mの東西変動と最大0.82mの南北変動が推定された。一方、西側が北西へ移動し、最大0.87mの東西変動と最大0.49mの南北変動が推定された。垂直方向では、断層の東側が断層中心付近で平均8cmを沈下し、西側が平均7cmを隆起した。推定された3次元の変動量を式(2)に代入し、算出された衛星視線方向の変動量を図6(b)に示す。PALSAR画像やPRISM画像から得られた変動結果と同じく、断層の東側が衛星から遠ざかり、西側が近づく傾向であった。また、本震の断層モデルはPALSAR画像から推定される断層より短いことがわかる。図6(a)に示す断面における変動量を図7の「CMT」で示す。また、断層面の東西それぞれの側の変動量を平均した結果を表1に示す。

現地調査によると、本震では断層面が地上に現れず、その後の余震で断層付近の変動が増幅し、地表面に露出した。また、余震によって断層が長くなり、アメリカ国境まで延長した。そのため、CMT解の断層モデルで得られた変動量は、余震の変動を含むPRISM画像やPALSAR画像の結果より小さいと考えられる。PALSAR_1の結果では、断層西側の変動量は断層モデルより小さかった。また、断面aからcについて、断層東側の変動量は断層モデルでの結果と比較的一致するものの、断面eからfの変動量はやや小さい。一方、PALSAR_2の変動量は断面eをのぞいて、すべて断層モデルより大きかった。したがって、余震の影響を考慮すると、PALSAR_2がPALSAR_1より変動量を正確に把握していると考えられる。

6. まとめ

本研究では地震前後のALOS-PALSAR画像を用いて、2010年バハ・カリフォルニア地震による地殻変動量を差分干渉処理法で検出した。衛星軌道に起因した軌道縞と地形縞を除去後、地殻変動と考えられる変動縞を2枚のPALSAR画像の位相差から求め、その後、2つの方法を利用して位相から衛星視線方向の変動量を推定した。ひとつの方法は、画像内に不動点としてGCPを与え、画像全体の位相をアンラップして求めた。この方法では、地表面の激しい変化による干渉性の低下と平均ウィンドウを使用したことで、得られた変動量が全体的に小さく、断層面の特定が難しかった。そこで、もうひとつの方法として、断層を直交する断面における位相を繋ぐことで変動量の推定を行った。断層から約30kmを離れた場所を基準とし、北東と南西の両側から断層線に向かってそれぞれ位相をアンラップさせた。得られた変動量は、画像全体をアンラップ処理した値より大きかった。

PALSAR画像から得られた2つの結果を検証するために、Matsuoka & Kodamaが地震前後のPRISM画像から検出された水平変動量¹⁰⁾およびCMT解の断層モデルから推定される変動量と比較した。PRISM画像は水平変動のため、この地震のメカニズムの場合、SAR画像で観測された衛星視線方向の変動量より小さくなる。一方、CMT解の断層モデルは本震のみのため、こちらの推定変動量も実際に観測された変動量より小さかった。以上より、PRISM画像と断層モデルの変動量よりも大きい変動量が得られた断層を直交する断面にて位相をアンラップした手法が有効と考えられる。今後は、PALSAR画像から得られた地殻変動量を用いて余震を含む断層モデルの作成を試みる予定にしている。

参考文献

- 1) The U.S. Geological Survey: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/ci14607652/#details>
- 2) Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M. and Imakiire, T.: Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, Vol.475, No.7356, 2011, pp. 373-377.
- 3) Chao, W., Wu, Y. and Zhao, L.: An automatic scheme for baseline correction of strong-motion records in coseismic deformation determination, *Journal of Seismology*, Vol.14, 2010, pp.495-504.
- 4) Wang, R., Parolai, S., Ge, M., Jin, M., Walter, T. R. and Zschau, J.: The 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of GPS and Strong-Motion Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.103, 2013, pp.1336-1347.

- 5) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute T.: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, Vol. 364, 1993, pp.138-142.
- 6) Feng, G., Ding, X., Li, Z., Mi, J., Zhang, L. and Omura, M.: Calibration of an InSAR-derived coseismic deformation map associated with the 2011 Mw-9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol.9, No.2, 2012, pp.302-306.
- 7) Michel, R., Avouac, J.-P. and Taboury, J.: Measuring ground displacements from SAR amplitude image: application to the Landers earthquake, *IEEE Geophysical Research Letters*, Vol.26, No.27, 1999, pp.875-878.
- 8) 飛田幹男, 藤原智, 村上亮, 中川弘之, Rosen, P. A.: 干渉SARのための高精度画像マッチング, *日本測地学会誌*, Vol. 45, 1999年, pp. 297-314.
- 9) Tobita, M., Suito, H., Imakiire, T., Kato, M., Fujiwara, S. and Murakami, M.: Outline of vertical displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery, *Earth Planets Space*, Vol.48, No.1, 2006, pp.e1-e4.
- 10) Matsuoka, M. and Kodama, S.: Coseismic displacement measurement of the 2011 EL Mayor, Mexico Earthquake by subpixel correlation from optical satellite images, *IGRASS*, 2011, pp.4010-4013.
- 11) UNAVO: <http://facility.unavco.org/data/dai2/app/dai2.html#scope=All;boundingBox=31.5,-118.2,34,-113.7>
- 12) Goldstein, R. M., Werner, C. L.: Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications, *Geophysical Research Letter*, Vol.25, No.21, 1998, pp.4035-4038.
- 13) Zebker, H.A. and Villasenor, J.: Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.30, No.59, 1992, pp.950-959.
- 14) Costantini, M.: A novel phase unwrapping method based on network programming, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.36, No.3, 1998, pp. 813 - 821.
- 15) The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project: <http://www.globalcmt.org/>

Detection of Surface Deformation due to the 2011 Baja California Earthquake from ALOS PALSAR Images

LIU Wen¹⁾, MATSUOKA Masashi²⁾ and YAMAZAKI Fumio³⁾

1) Member, Assistant Professor, Chiba University, Japan, Dr. Eng.

2) Member, Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Japan, Dr. Eng.

3) Member, Professor, Chiba University, Japan, Dr. Eng.

ABSTRACT

An Mw 7.2 earthquake affected Baja California, Mexico on April 4, 2010. Due to the movement of Laguna Salada Fault, significant surface deformation was observed. In this study, the displacements occurred around the fault were detected by differential interferometry analysis (DInSAR) using the pre-and post-event ALOS PALSAR satellite images. A digital elevation model with 90 m resolution was introduced to remove the phases caused by the elevation. The displacements were obtained in a large area by unwrapping the phases generally. However, the results are much smaller by comparing with the result obtained by the pixel-offset analysis of ALOS PRISM images. Then six sections cross the fault were selected to unwrap the phases directly. Those results were verified and discussed by comparing with the displacements estimated from a Centroid Moment Tensor solution.

Keywords: Synthetic aperture radar imagery, Differential interferometry analysis, Phase unwrap, Fault model