

ALOS/PALSAR による地震時地殻変動と山岳氷河変動の検出
: 2008 年 3 月 20 日于田(Yutian)地震(Mw7.1)と崑崙山脈の西端

北海道大学 理学部 地球科学科 4 年

地球惑星ダイナミクス分野

宇宙測地学研究室

安田 貴俊

22060154

指導教官 古屋 正人

**Detection of Co-seismic Deformation and Mountain Glacier
Fluctuations by ALOS/PALSAR: the Yutian Earthquake (Mw7.1)
on March 20, 2008, and the western edge of Kunlun Mountains**

Takatoshi Yasuda (Hokkaido University)

仮提出日 2010 年 1 月 29 日

本提出日 2010 年 2 月 19 日

概要

タリム盆地の南部にある崑崙山脈はインドプレートとユーラシアプレートの衝突の過程で形成された。衝突境界における地殻変動の観測はテクトニクスを理解する上で重要である。一方、チベット高原のような高地には山岳氷河が発達しており、地球温暖化に伴う氷河の時空間分布の変化の監視も重要である。しかしながら 4000~6000m 級の山が連なる厳しい自然環境のため、GPS などを用いたその場での観測は困難を極める。衛星を用いたりリモートセンシングを用いれば、現地に赴かずに広範囲かつ連続的に観測を行うことが出来る。

本研究では、宇宙航空研究機構（以下、JAXA）が 2006 年 1 月に打ち上げた ALOS(Advanced Land Observing Satellite, 日本名「だいち」)に搭載された合成開口レーダー PALSAR が 2007 年 9 月から 2009 年 6 月までに取得した 9 つのデータからもとに、地殻変動と山岳氷河の二つの変動を検出した。

1 つ目はタリム盆地南部に位置する崑崙山脈の高地で 2008 年 3 月 20 日に発生した于田地震 (Mw7.1) に伴う地殻変動である。先行研究として、Shao and Ji (2008)により地震波形のデータからインバージョンが行われている。本研究では観測データを使いより複雑なモデルを提唱する。2008 年 1 月 26 日と 4 月 27 日に取得したデータをもとに差分干渉処理を行った結果、西側で視線方向に近付き、東側で遠ざかる正断層によると考えられる地殻変動を検出することが出来た。そのデータを基に半無限均質弾性体中の矩形断層モデル (Okada et al, 1992)を用いて、断層のパラメータを推定し、滑り分布のインバージョン解析を行った。

2 つ目は震源近傍の氷河の変動である。時系列順の組み合わせでピクセルオフセット解析を行い氷河の変動を検出することが出来た。衛星の二回帰分にあたる 92 日間で変動を見ると夏季に 25m を越す最大変位を検出した。また、同じ季節に取得されたデータの色差を検証し、于田地震により氷河の変動が影響を受けていないか、具体的には加速されている可能性について調べた。

目次

1	はじめに	1
1.1	衛星による測地	1
1.2	高分解能の実現	2
1.2.1	レーダ技術のジオメトリ	2
1.2.2	実開口における分解能	2
1.2.3	チャープパルス	3
1.2.4	合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR)	5
1.3	ALOS/PALSAR について	6
1.4	目的	6
2	観測・解析手法	7
2.1	観測地域・対象	7
2.2	使用したデータ	7
2.2.1	ALOS data	7
2.2.2	数値標高モデル(Digital Elevation Model ;DEM)	8
2.3	SAR データの処理	9
2.3.1	SAR 画像	9
2.3.2	干渉合成開口レーダ(Interferometric SAR ;InSAR)	10
2.3.3	SAR ピクセルオフセット解析: Intensity Tracking	12
2.3.4	変動量について	13
2.4	Okada (1985、1992)	13
3	観測結果	14
3.1	于田 (Yutian) 地震による地殻変動	14
3.2	崑崙山脈氷河の観測結果	17
4.	考察	26
4.1	断層モデル	26
4.2	氷河の変動	28
4.2.1	季節による変動の違い	28
4.2.2	于田地震は氷河の速度を加速させたか	32
5	まとめ	34
6	課題	34
7	謝辞	35
8	参考文献・画像引用	35

1 はじめに

1.1 衛星による測地

近年の測地技術の発展に伴い 1970 年代から VLBI (Very Long Baseline Interferometry)、SLR (Satellite Laser Ranging)、GPS (Global Positioning System) といった宇宙測地技術が発達してきた。特に GPS は空間、時間分解能が高く地表の変動を観測するのによく用いられる。しかし、GPS による観測は地上に測定点を設置する必要があるため、事前に発生場所が分からない地震による地殻変動を観測するには観測点の空間的密度を高める以外に方法はない。また、氷河の変動を観測するためには現地にアンテナを設置する必要がある。どちらにせよ厳しい環境、4000m を越える高山域などでは困難を極める。そうした中、1990 年代から地表の変動の観測法として合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; SAR) を利用した技術が注目を浴びてきた。一定の日数で回帰しながらマイクロ波を地表に照射する人工衛星のデータを用いることで、地表に観測点を設置せずに広範囲かつ高い分解能をもつ画像を天候に関係なく生成することが可能となった。地震時地殻変動を検出した有名な先例に Landers 地震がある (Massonnet, D. et al. 1993)。広範囲かつ高い空間分解能で地殻変動の分布を捉えた報告は当時、大きな話題を呼んだ。その後も技術の進歩に伴い、様々な地表の変動が報告されてきた。2002 年にはノルウェー、スヴァールバル諸島北部の Monacobreen の氷河の変動の検出が報告され (Tazio Strozzi. et al. 2002)、2007 年にはヒマラヤ氷河の変動が検出されている (Adrian Luckman. et al. 2007)。これらの報告ではすでに確立されている技術と新しい技術で観測結果の比較を行い、SAR を利用した氷河の観測の有用性が示されている。

1.2 高分解能の実現

単一のレーダアンテナの地上分解能はその実開口に比例し、周波数一定の単調なマイクロ波の場合、パルス幅に反比例する。しかし、アンテナの大きさやパルス幅で実現可能な分解能には限界がある。そのため高分解能を実現するためにチャープパルスと合成開口の技術が用いられている。

1.2.1 レーダ技術のジオメトリ

レーダ技術は極座標を使っていたことの名残から独特の座標を持っている。衛星の進行方向をアジマス方向(Azimuth direction)。衛星から観測点へ電波を放射する方向をスラントレンジ(Slant range)。鉛直下からスラントレンジまでの角度をオフナディア角。スラントレンジを地表に射影した方向をグラウンドレンジ(Ground range)と呼びます。衛星搭載レーダは進行方向右下に放射するサイドルッキング方式のため、図で表すと Fig1.1 のようになる。特に断りがなければ以後レンジはスラントレンジを指すものとする。

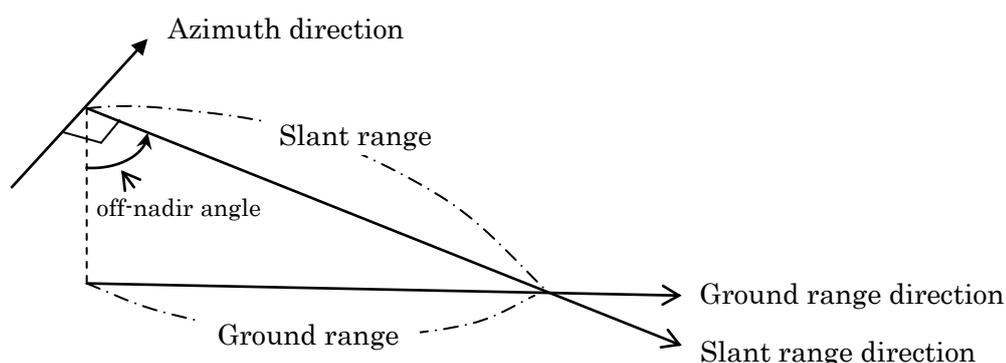


Fig.1.1 SAR におけるジオメトリ

1.2.2 実開口における分解能

まず、周波数一定のマイクロ波を用いた実開口の分解能について述べる。レーダは地表で散乱された電磁波を受信し観測を行うため照射する範囲が狭いほど精度は向上する。一般に放射されるビーム幅 $\Delta\theta_A$ はレンジ距離 R_0 、波長 λ 、アンテナ長 D_A を用いて次の式で表される。

$$\Delta\theta_A = 0.88 \frac{\lambda R_0}{D_A} \quad (1.1)$$

波長 λ は一定であるため、細いビームを照射するためには長いアンテナが必要になる。

レンジ方向の分解能にはパルス持続時間 T_p が関わってくる。地表に点散乱体 A、B が存在し、それぞれのレンジ距離 R_A 、 R_B 、グラウンドレンジの差を ΔY 、入射角 θ_i とする(Fig1.2 (a))。

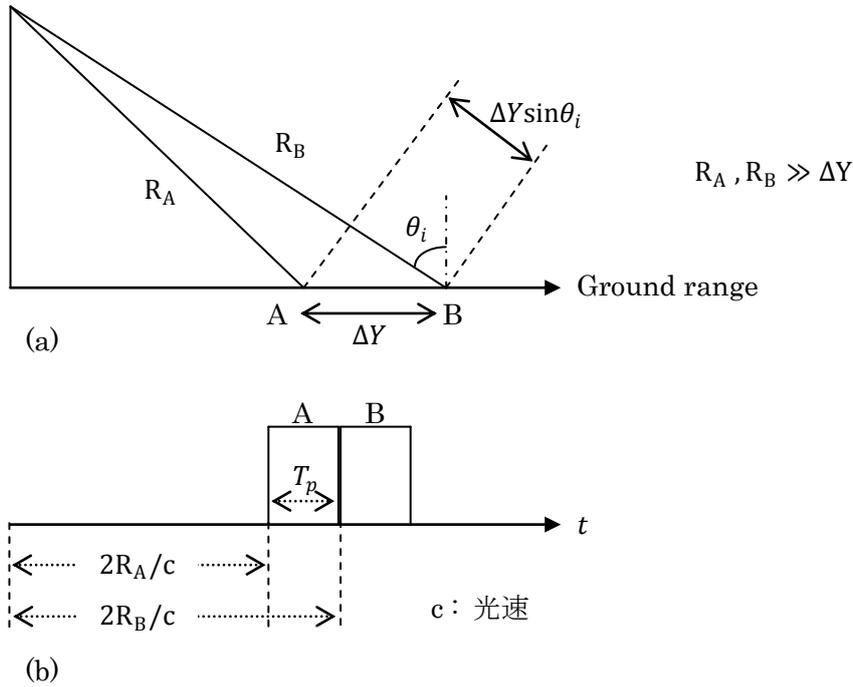


Fig.1.2 グラウンドレンジ方向の分解能

パルスを発信した時間を $t = 0$ とする。散乱体 A と B の距離が近くなるとそれぞれのリターンの信号が重なってしまい二つを区別することが不可能となる (Fig1.2 b)。つまり、地表の分解能幅 ΔY は

$$\Delta Y = \frac{cT_p}{2\sin\theta_i} \quad (1.2)$$

となり、パルス継続時間 T_p によって決定される。

高分解能を達成するために実現可能な実開口幅には限界がある。また観測機器に由来するノイズのため、短いパルスを用いるには大きな出力が必要となってしまう、電力に制限がある衛星では望ましくない。そのため高分解能を達成するためにチャープパルスによるパルス圧縮技術と合成開口が利用されています。

1.2.3 チャープパルス

チャープパルス (Chirp Pulse) とは周波数が時間とともに線形に変化する線形 FM パルス (Linear Frequency Modulation Pulse) のことで次の式で表される。

$$v(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cos\{\psi(t)\} \quad (1.3)$$

$$\psi(t) \equiv 2\pi\left(f_c t + K_r \frac{t^2}{2}\right) \quad (1.4)$$

ここで、 T_p はパルス持続時間。 f_c [GHz] は中心周波数。 K_r はチャープ率。 $\text{rect}(t/T_p)$ は長さ T_p の矩形関数を表します。周波数 $\psi(t)$ の時間微分 $f(t)$ は

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = f_c + K_r t \quad (1.5)$$

となり、時間とともに線形に変化することが分かります。パルス持続時間は決まっているため、周波数が増える幅としてバンド幅が定義される。

$$B_w^r \equiv K_r T_p \quad (1.6)$$

バンド幅は数 10MHz の単位であるが、散乱体の情報はこの帯域に保存されている。そのため、レンジ距離 R_0 で散乱し、センサーに受信するデータは $t_0 = 2R_0/c$ として

$$v_r(t) \propto \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \cos\{\psi(t-t_0)\} \quad (1.7)$$

となるが記録時には高周波の成分 $f_c t$ [GHz] はフィルタにより落とされ、低周波のみが複素数データとして保存される。

$$v_r^*(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \exp\{j\psi_r(t-t_0)\} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \psi_r(t-t_0) &\equiv 2\pi \left(K_r \frac{(t-t_0)^2}{2} - f_0 t_0 \right) \\ &= 2\pi \left(K_r \frac{(t-t_0)^2}{2} - \frac{2R_0}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

これが衛星に記録されるレンジ成分の生データ (raw data) となる。受信信号は整合フィルタ (Matched filter) にかけて、結果として次の式が抽出される。

$$v_{out}(t) = T_p \text{sinc}\{K_r T_p (t-t_0)\} \quad (1.10)$$

ただし、 $\text{sinc} = \sin(x)/x$ である。分解能の基準にはいくつかの種類があるがここではレーリー分解能を使用する。レーリー分解能は $\text{sinc}(x)$ がピークから初めて 0 となる幅を分解能幅とするもので、この基準を用いると抽出されたパルスの継続時間 T_{out} は

$$T_{out} = \frac{1}{K_r T_p} = \frac{1}{B_w^r} \quad (1.11)$$

となり、バンド幅の逆数が処理後のパルス継続時間となる。(1.2)式よりチャープパルスを用いない場合、レンジ方向の分解能は

$$\Delta r = \frac{c T_p}{2} \quad (1.12)$$

チャープパルスを用いた場合は

$$\Delta r_{out} = \frac{c T_{out}}{2} = \frac{c}{2 K_r T_p} = \frac{c}{2 B_w^r} \quad (1.13)$$

チャープパルスを用いることによりパルス幅と分解能が $K_r T_p^2$ 倍に圧縮されていることが分かる。無次元量 $K_r T_p^2 (= T_p B_w^r)$ は Time-Bandwidth Product と呼ばれる。つまりチャープパルスを用いる場合、バンド幅が広いほどより高い分解能が実現されることが分かる。以上がパルス圧縮技術の概要でレンジ方向の分解能向上に実用されている。

1.2.4 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR)

合成開口レーダとはアジマス方向の分解能を高める手法の一つである。合成開口とは連続的にマイクロ波を対象に照射することで、空間上に仮想的に連続するアンテナを合成する技術のことである。それに加え、ドップラー効果を利用しチャープパルスの時と似た圧縮技術を用いることでアジマス方向の高分解能が実現されている。

実開口ではアンテナ上に配列した素子から電磁波が放射される。一方合成開口では実開口がその素子に相当する(Fig1.3)。

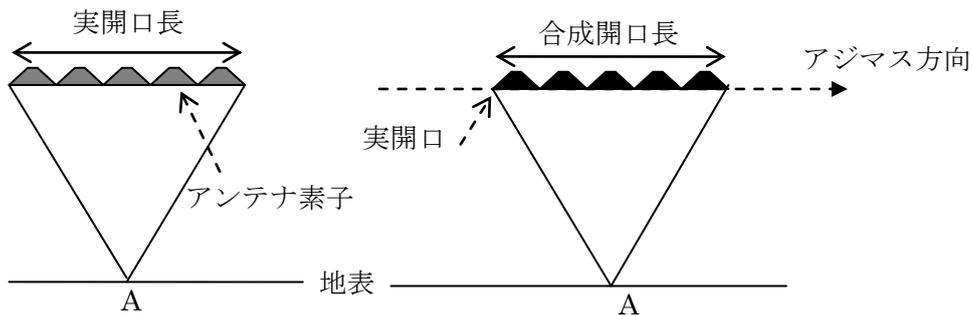


Fig.1.3 合成開口の構造

連続して送受信を行うことで空間上に大きな開口が合成される。達成される合成開口長は地表の散乱体 A がビームを浴びている間に衛星が移動した距離、つまり、(1.1)式で表される実開口のビーム幅が合成開口長である。例として ALOS/PALSAR の値を入れてみると合成開口長は約 16km と算出される。

アジマス方向は合成開口に加えて、ドップラー効果を利用した圧縮技術が用いられている。結果だけを述べると、アジマス方向の分解能 Δa は

$$\Delta a = \frac{D_A}{2} \quad (1.14)$$

で与えられ、衛星の高度や波長によらずアンテナサイズのみで決定される。

1.3 ALOS/PALSAR について

宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA)により、2006 年 1 月 24 日に陸域観測技術衛星「だいち」(Advanced Land Observing Satellite; ALOS)が打ち上げられた。収集されたデータは災害時の緊急観測をはじめとし多くの場面でこれまで活用がされてきました。フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PALSAR) は ALOS に搭載されている地球観測センサーの一つである。フェーズドアレイ方式とは照射するマイクロ波の位相面の向きを変えることでアンテナの向きを変えずにマイクロ波の照射方向を変えることが出来る方式のことである。Table1.1 は ALOS/PALSAR の主要なデータである。モードの FBS と FBD は受信する偏波の違いで、FBD はその仕組み上、バンド幅が FBS の半分となりレンジ方向の分解能も半分に低下する。



Fig.1.4 ALOS image. (C) JAXA

Mode	FBS	FBD
Center Frequency	1270 MHz(L-band)	
Recurrent Period	46 days	
Inclination	Approx. 98°	
Off-nadir angle	34.3°	
Chirp Bandwidth	28MHz	14MHz
Polarization	HH VV	HH+HV VV+VH
Incident angle	8~60°	8~60°
Range Resolution	7~44m	14~88m

Table1.1 ALOS/PALSAR の主要データ

1.4 目的

本研究ではリモートセンシングの技術を用いて、ALOS/PALSAR が 2007 年 9 月から 2009 年 6 月までに取得した 9 つのデータからもとに、2008 年 3 月 20 日に発生した于田地震 (Mw7.1) に伴う地殻変動と観測期間における氷河の変動量の解析を行う。そして、得られた観測量から、断層の推定を行う。山岳氷河の動向は気候変動のトレンドに大きく影響を受ける。また GLOF (Glacier Lake Outburst Flood; 氷河湖決壊洪水) などの災害予知のためにも氷河の観察は重要である。本研究ではそこまで深く触れず、季節による速度の変化と于田地震で氷河の変動量の影響について考察を目的としている。

2 観測・解析手法

2.1 観測地域・対象

タリム盆地南部、中国チベット自治区と新疆ウイグル自治区の境にある崑崙山脈が本研究の観測地域である。4000m を越える高山地帯ということもあり、この地域における地表の変動は報告されていなかった。

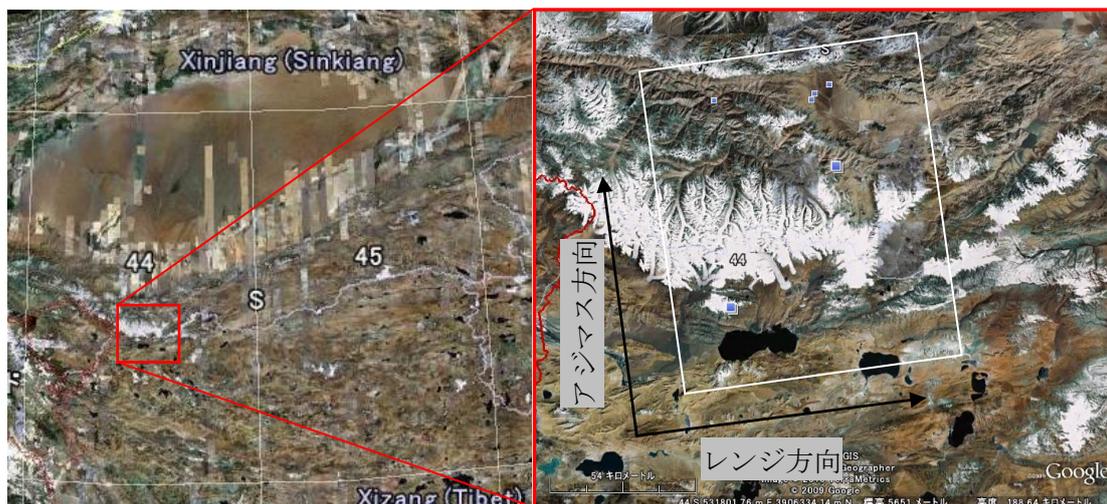


Fig.2.1 観測地域

2.2 使用したデータ

2.2.1 ALOS data

本研究で使用したデータは2007年9月から2009年6月までにALOS/PALSARにより取得されたデータを用いた(Table)。軌道番号は515。観測範囲をカバーするためrow 690と700を結合して使用した。便宜上イベント前のデータをMaster、イベント後のデータをSlaveと以下呼称する。于田地震(Mw7.1)の解析には発生日2008年3月20日を挟む、2008年1月26日と4月27日のデータを用いた。氷河の変動の解析には時系列順の組み合わせで解析を行った。

Observe date (YYYYMMDD)	Mode	Incident angle
20070910	FBD	39.1463°
20071211	FBS	38.9271°
20080126	FBS	38.9368°
20080427	FBD	39.1392°
20080612	FBD	39.1269°
20080728	FBD	39.1517°
20081213	FBS	38.9371°
20090128	FBS	38.9318°
20090615	FBD	38.9318°

Table2.1 使用データの受信モードと入射角

2.2.2 数値標高モデル(Digital Elevation Model ; DEM)

数値標高モデルは地形の影響を処理する時に使用される。本研究では SRTM 4 を使用した。SRTM 4 は NASA の SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) で収集されたデータから作成された標高モデルから欠損を改良したデータである。空間分解能はアメリカ国内で 1 秒メッシュ (約 30m)、極域を除く全世界で 3 秒メッシュ (約 90m) の精度で公開 (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) されている。

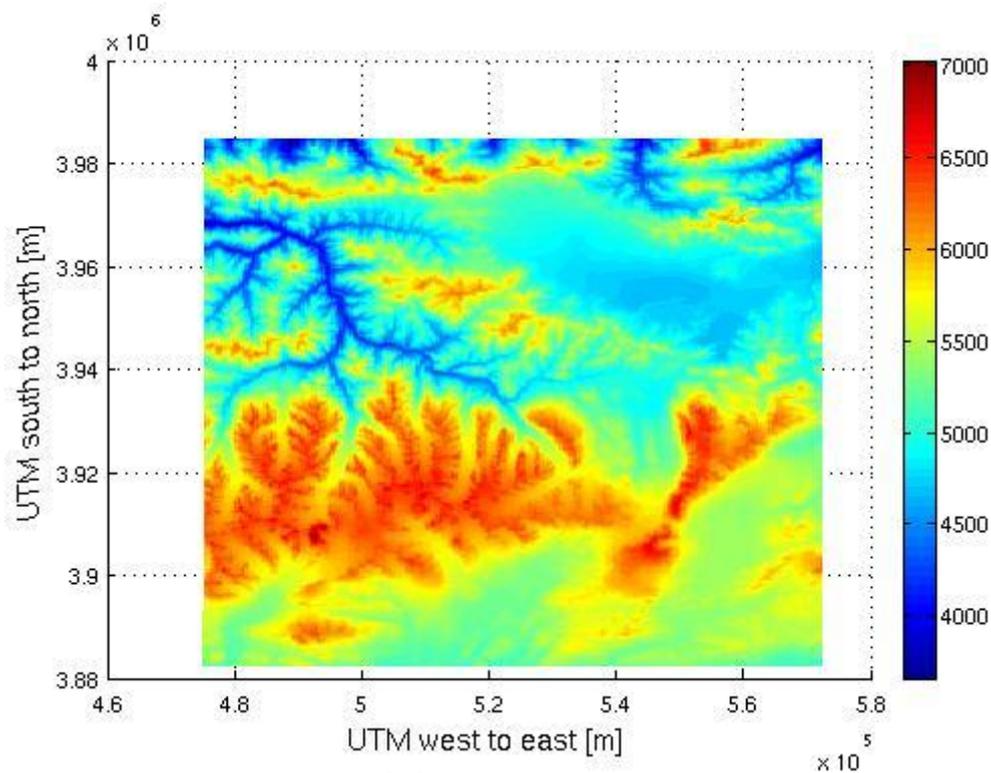


Fig.2.2 観測地域の標高モデル [m]

2.3 SAR データの処理

2.3.1 SAR 画像

人口衛星に記録されたデータは生データ(raw data)と呼ばれる。raw data は地表面の点ターゲットの集まりと 2 次元インパルス応答との畳み込み積分の結果であるため Range 方向と Azimuth 方向へ圧縮しなければ画像として見ても意味はない。観測エリアの情報を取り出すためには raw data から特定のアルゴリズムによりデータ処理を行う必要がある。本研究で行った処理は Range-Doppler Algorithm を利用した。raw data に処理を施した後、SAR 画像が生成される (Fig 2.3)。Fig2.3 は強度を表した画像である。レーダ座標(Range Doppler Coordinate : RDC)で表現されるため、標高の高い山の峰などはレンジ方向に近づいているように見える。また、山の影となる部分や平地は後方散乱が少ないため強度画像では暗く写る。

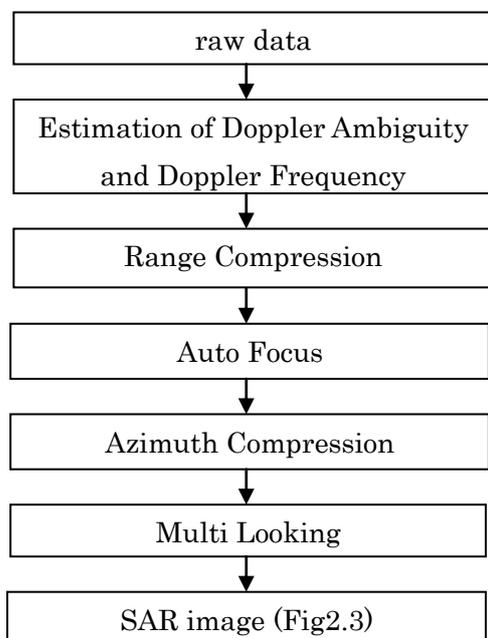


Chart 2.1 SAR 画像生成までの流れ



Fig.2.3 生成された SAR image の強度画像。

2.3.2 干渉合成開口レーダ(Interferometric SAR ;InSAR)

InSAR (Interferometric SAR)とは時間的もしくは空間的に異なる同一地域の2セットの相関している複素画像を干渉させて地表高度や地殻変化を計測する技術である。今回用いた手法は地殻変動を起こすイベントを跨いだ2枚のSAR画像を使い干渉をとることで地殻変動の情報を取得する差分干渉SAR (Differential InSAR: DInSAR)と呼ばれる技術である。しかし、InSARと一般に言う場合ほとんどこれを指す。取得した変動は地表変動を3次的にとらえたものではなく、変動を人工衛星の視線方向(Line of Sight : LOS) (ほぼレンジ方向と同一)に投影したものであることに注意する必要がある。

差分干渉法の原理はヤングの実験で知られる干渉縞の原理に似ている。この実験では位相の揃った波がスリット S_1 と S_2 を通過し十分離れた平面上で干渉縞を見ることが出来る。平面が平坦であれば干渉縞は平行に現れ(軌道縞に相当)、また起伏が存在するならその高さに応じた干渉縞(地形縞に相当)が現れる。InSARに戻って考えると、位相の揃った波がマイクロ波、スリットが衛星の位置、平面が地表に相当する。二つのデータの位相差が干渉縞として生成画像に現れる。位相差が起こる要因には衛星位置のずれによる軌道縞(ϕ_{orbit})、地形の影響による地形縞(ϕ_{topo})、大気・電離層の影響(ϕ_{atm} , ϕ_{ion})、そして、観測期間内に変動が起これば地表の変動が変動縞($\phi_{displace}$)として現れる。

$$\Delta\phi = \phi_{orbit} + \phi_{topo} + \phi_{displace} + \phi_{atm} + \phi_{ion} + \phi_{noise} \quad (2.1)$$

もし、軌道のずれがなければ地表までの二つのデータの相対的な距離は等しく、位相差は地表の変動と大気・電離層の影響のみが考えられる。しかし、実際は軌道のずれが存在するため、地表の変動を得るためにはそれらを除く必要がある。また、衛星の位置が離れすぎると軌道縞が密になり観測可能な分解能を超え相関低下を引き起こし、干渉が不可能となる。地表変動以外の影響を除いたのならば地表の変位 Δr と位相差 $\Delta\phi$ はマイクロ波の往復を考慮し、波数 k を用いて次の式で表される。

$$\Delta\phi = 2k\Delta r \quad (2.2)$$

L-band (中心周波数 1270 MHz) の場合を例とすると、 6π の位相差は約 34cm の変位に相当する。

SLC 画像から干渉画像を作成までは chart 2.2 の流れになる。まず撮影位置のずれを修正し初期干渉画像が作成される(Fig2.4a)。この時点ではまだ軌道縞や地形縞が存在する(Fig2.4c)。そのため、視覚的に地表に変動があるかを判断することは難しい(Fig2.4b)。軌道情報と DEM から軌道縞と地形縞を除去した画像が Fig2.5 である。初期干渉画像には見られなかった変動縞を明瞭に見ることが出来る。ただし、この段階での位相は連続に増加しているのではなく $-\pi$ から π の値(wrapped phase)である。不連続の位相をつなげる工程は phase unwrapping と呼ばれる。相関が低い箇所は unwrapping を失敗させるのでマスクが掛けられる。最後に座標をレーダー座標から UTM 座標に変換し Fig2.6 が生成される。黒い部分はマスクが掛けられた部分である。大気の影響も含まれているが、地表の変動を捉える事が出来ている。

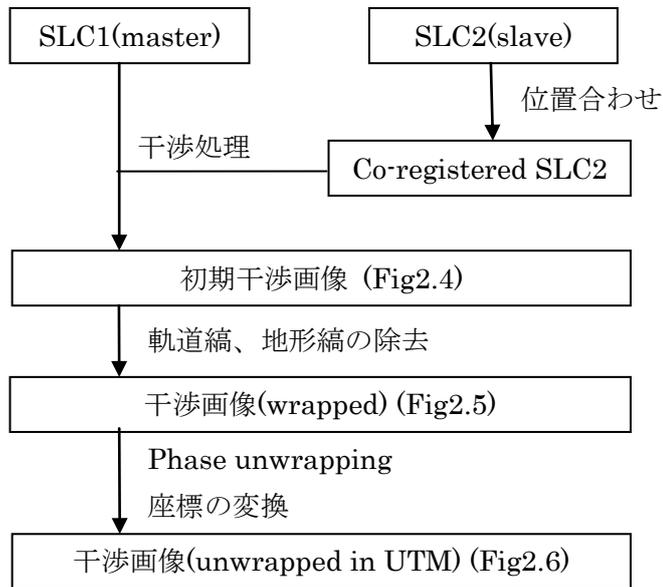


Chart 2.2 干渉画像生成までの流れ

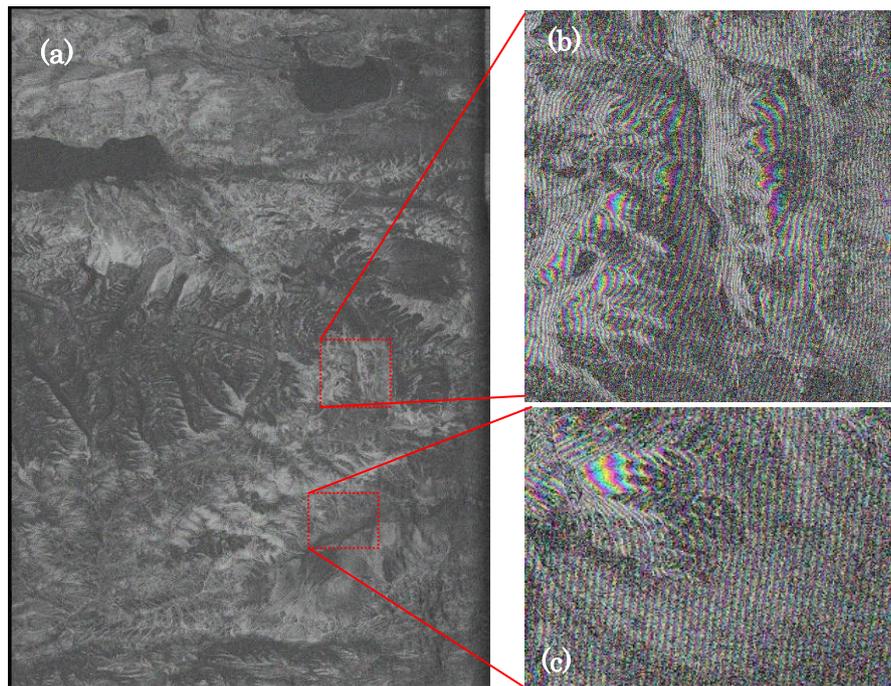


Fig.2.4 初期干渉画像(a)とその拡大図。(c)の右下の平行な縞が軌道縞、その左上の縞の歪みが地形縞。(b)には軌道縞、地形縞に加えて変動縞も含まれている。

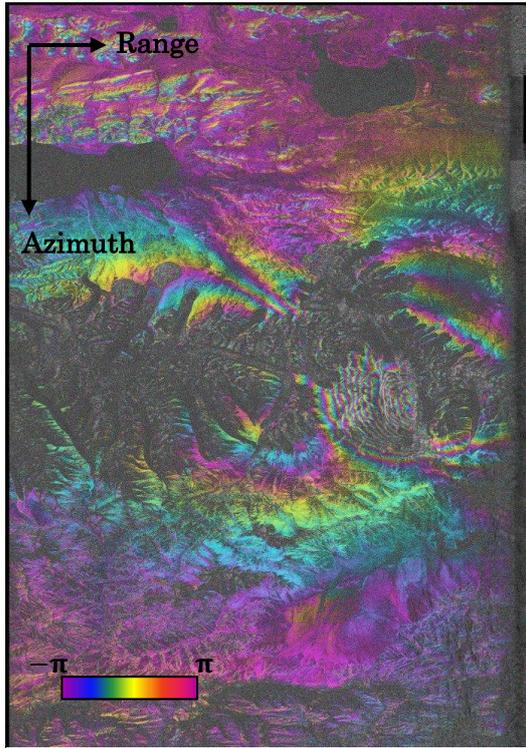


Fig. 2.5 干渉画像(wrapped)：初期干渉画像では分からなかった変動縞が明瞭に表れる．この段階では位相は $-\pi$ から π までの任意性を持っている。

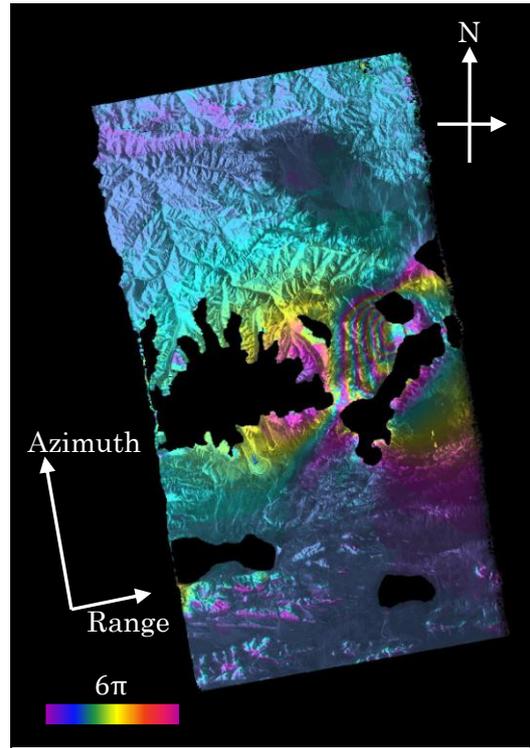


Fig. 2.6 干渉画像 (Unwrapped in UTM)：最終的に生成される画像．色相の周期は 6π で表している。

2.3.3 SAR ピクセルオフセット解析: Intensity Tracking

SAR ピクセルオフセット解析とは同一地域の2セットの SAR 画像を 1 ピクセルよりも細かいサブピクセルの精度で画像のマッチングを行うことで高分解能を実現し変動を検出する手法である。コヒーレンスを追う方法と、強度を追う方法があるが、今回用いたのは画像の強度を追う強度トラッキング(Intensity Tracking)である。差分干渉法に比べると精度が落ちるが、視線方向に加えてアジマス方向の変位を観測できること、相関が低くとも変動を捉えられること、変動がそのまま検出されるので unwrapping を行う必要がないことが利点になる。

2.3.4 変動量について

差分干渉法とピクセルオフセット解析で検出された変動は地表の 3 次元の変動をレンジとアジマス方向に射影したものである。レンジ、アジマスの変位量 U_{ran} , U_{azi} と東西成分 U_E 、南北成分 U_N 、鉛直成分 U_Z の変動量は進行方向を真北から時計回りに図った Heading 角 H と地表への入射角 θ_i を用いて

$$\begin{pmatrix} U_{ran} \\ U_{azi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos H \sin \theta_i & -\sin H \sin \theta_i & -\cos \theta_i \\ \cos H & \sin H & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_E \\ U_N \\ U_Z \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

昇交軌道の場合の ALOS/PALSAR 値 $H = -8^\circ$, $\theta_i = 39^\circ$ を代入すると

$$\begin{pmatrix} U_{ran} \\ U_{azi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.62 & 0.11 & -0.78 \\ -0.17 & 0.98 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_E \\ U_N \\ U_Z \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

この値は方向に対する感度でもある。つまり、アジマスの変動量は南北に感度が高い。またレンジ方向の変動量は東西に感度が強く、3 成分を持つことが分かる。

2.4 Okada(1985, 1992)

Okada(1985, 1992)はそれまで発表されていた論文をまとめ、半無限の均質弾性体中に矩形断層を想定することで地表の構造的な変化を合理的に説明する断層モデル(Okada model)を紹介した。すでに提唱されていた半無限弾性体の計算式に断層のずれや開口運動などを導入したもので、断層のずれの量や開口量と観測量(変位・傾斜・歪み)を共通のパラメータで表現できるように関連付けたものである。

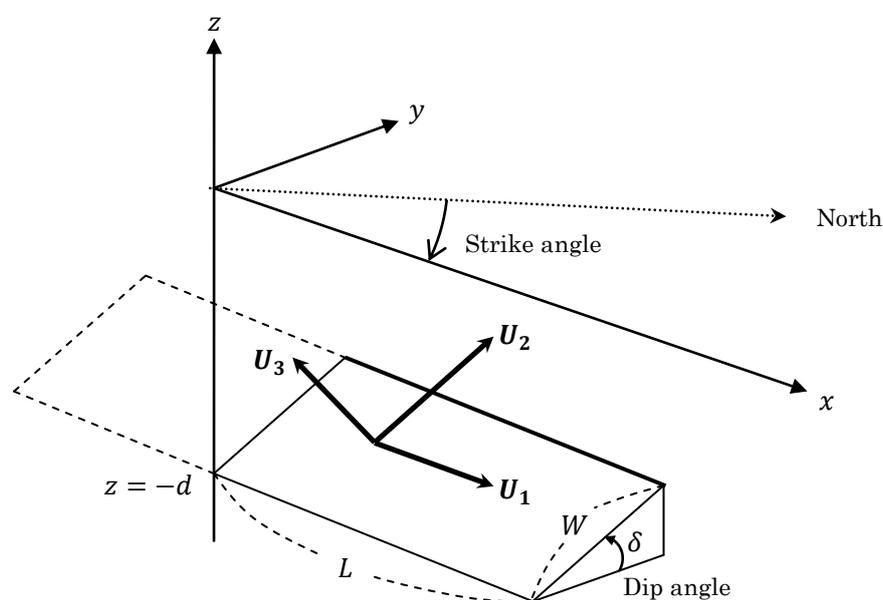


Fig.2.7 Okada model におけるジオメトリ

3 観測結果

3.1 于田 (Yutian) 地震による地殻変動

2008年1月26日と2008年4月27日のデータをもとに差分干渉を行った結果、ある地点を境にして視線方向に対し東側で最大180cm遠ざかり、西側で20cm近づく正断層によるものと思われる変動を捉える事が出来た(Fig.3.1)。ピクセルオフセットで得られた結果を解析したところ、レンジ方向では差分干渉法と同様の変動が観測された(Fig.3.2)。アジマス方向では東側が南に150cmを越える変動を観測した(Fig.3.3)。

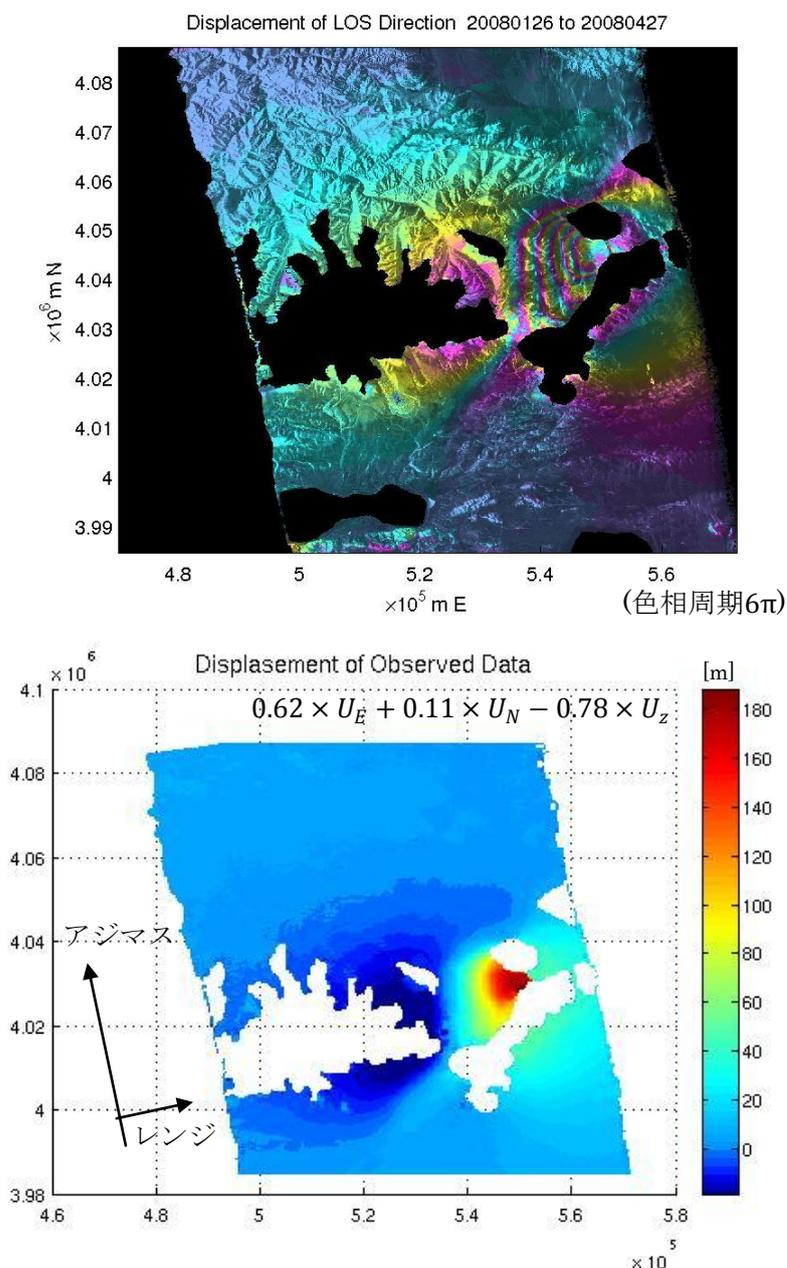


Fig 3.1 差分干渉法の観測結果. 生成画像(上)とその変動量(下).

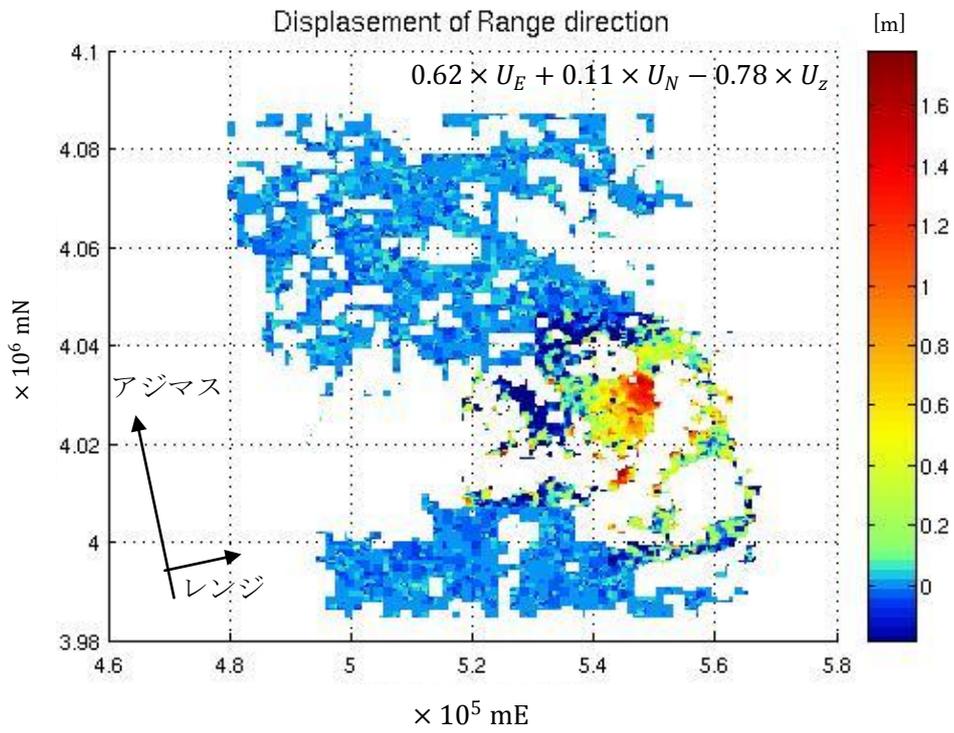
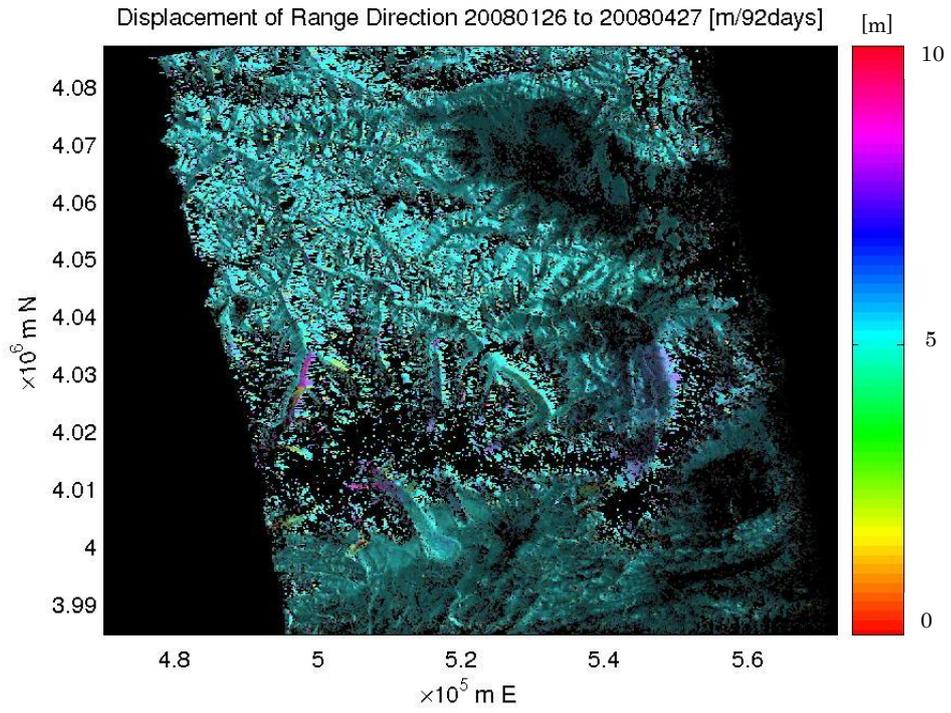


Fig 3.2 ピクセルオフセット(レンジ方向)の観測結果, 生成画像(上)とその変動量(下).

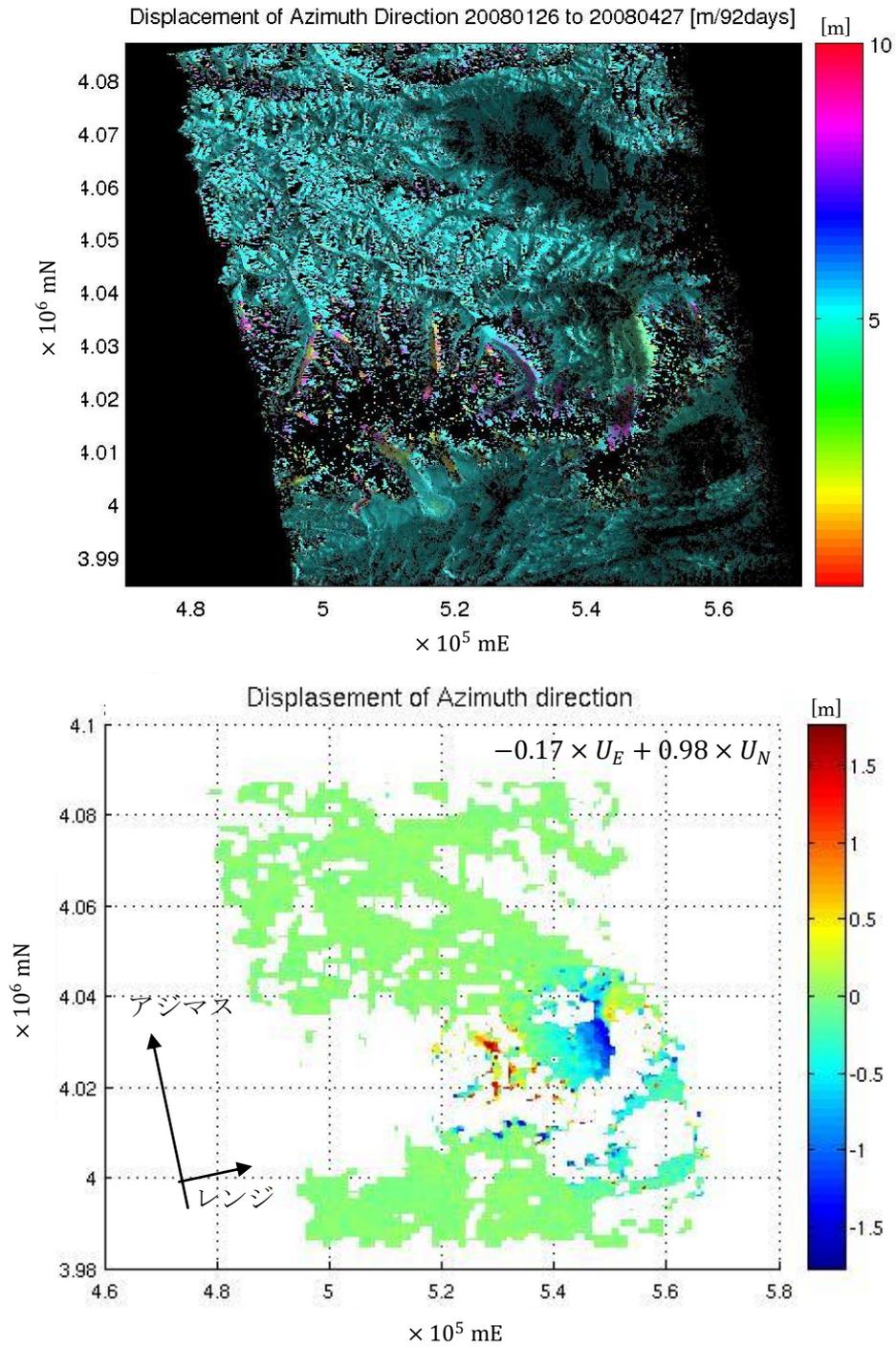


Fig. 3.3 ピクセルオフセット（アジマス方向）の観測結果. 生成画像（上）とその変動量（下）.

3.2 崑崙山脈氷河の観測結果

ピクセルオフセット解析を時系列順のペアで行った結果、基線長が 1000m 以内のデータの組み合わせで氷河の変動を検出することが出来た。特に FBS 同士で基線長が 300m 以内のペアは氷河の変動を明瞭に検出することが出来た。基線長が 1500m を越えるペアは Dem のエラーが、特に雪氷に覆われた高山域で強く反映されてしまい変動を検出することはほとんど出来なかった。

Pair	MasterDate_SlaveDate (YYYYMMDD_YYYYMMDD)	Mode	Bperp 1 [m] (row 690)	Bperp2 [m] (row 700)	Span	Result
A	20070910_20071211	FBD/FBS	619.6	627.27	92 days	○
B	20071211_20080126	FBS/FBS	284.15	290.82	46 days	◎
C	20080126_20080427	FBS/FBD	1196.75	1203.56	92 days	○
D	20080427_20080612	FBD/FBD	-7080.45	-7085.68	46 days	×
E	20080612_20080728	FBD/FBD	3734.27	3709.82	46 days	×
F	20080728_20081213	FBD/FBS	-1868.71	-1884.9	138 days	×
G	20081213_20090128	FBS/FBS	261.81	269.05	46 days	◎
H	20090128_20090615	FBS/FBD	659.87	669	138 days	○

Table 3.1 ピクセルオフセット法の結果

データには位置合わせのエラーに由来する異常値が含まれている。そのため氷河の動きを取り出すため以下の処理を行った。30m を越える変動量は画像全体から落とし、Median Filtering を行った。氷河の変動とは明らかに関係のないエリアにマスクをかけ、データ量を効果的に減らすため、閾値を 0.7m として Quad tree decomposition (e.g., Jonsson et al., 2002) の処理を行った。

またデータにより観測日数は異なっているため検出した変位は時間スケールが揃っていない。そのままではデータを比較する際に不便であるため特定の期間で変動量を統一する必要がある。于田地震を挟む 2008 年 1 月 26 日と 4 月 27 日の観測データの日変動量は一定でないと考えられる。そのため 92 日を基準とし、氷河の変動量は一定であると仮定することでデータの補正を行った。Fig.3.4 から Fig.3.12 が生成画像、処理前の変動量、処理後の変動を並べたものである。

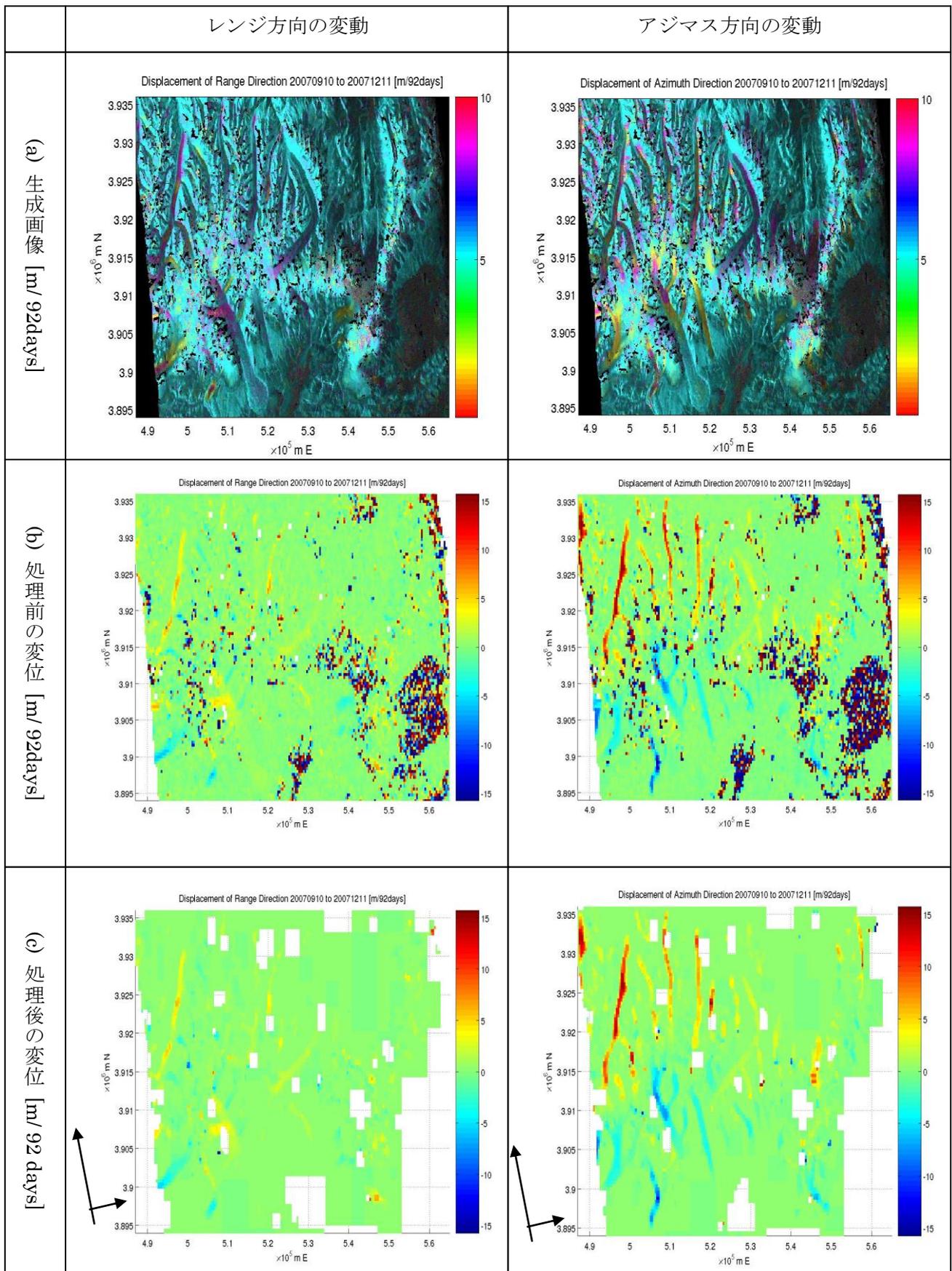


Fig. 3.4 20070910_20071211 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位

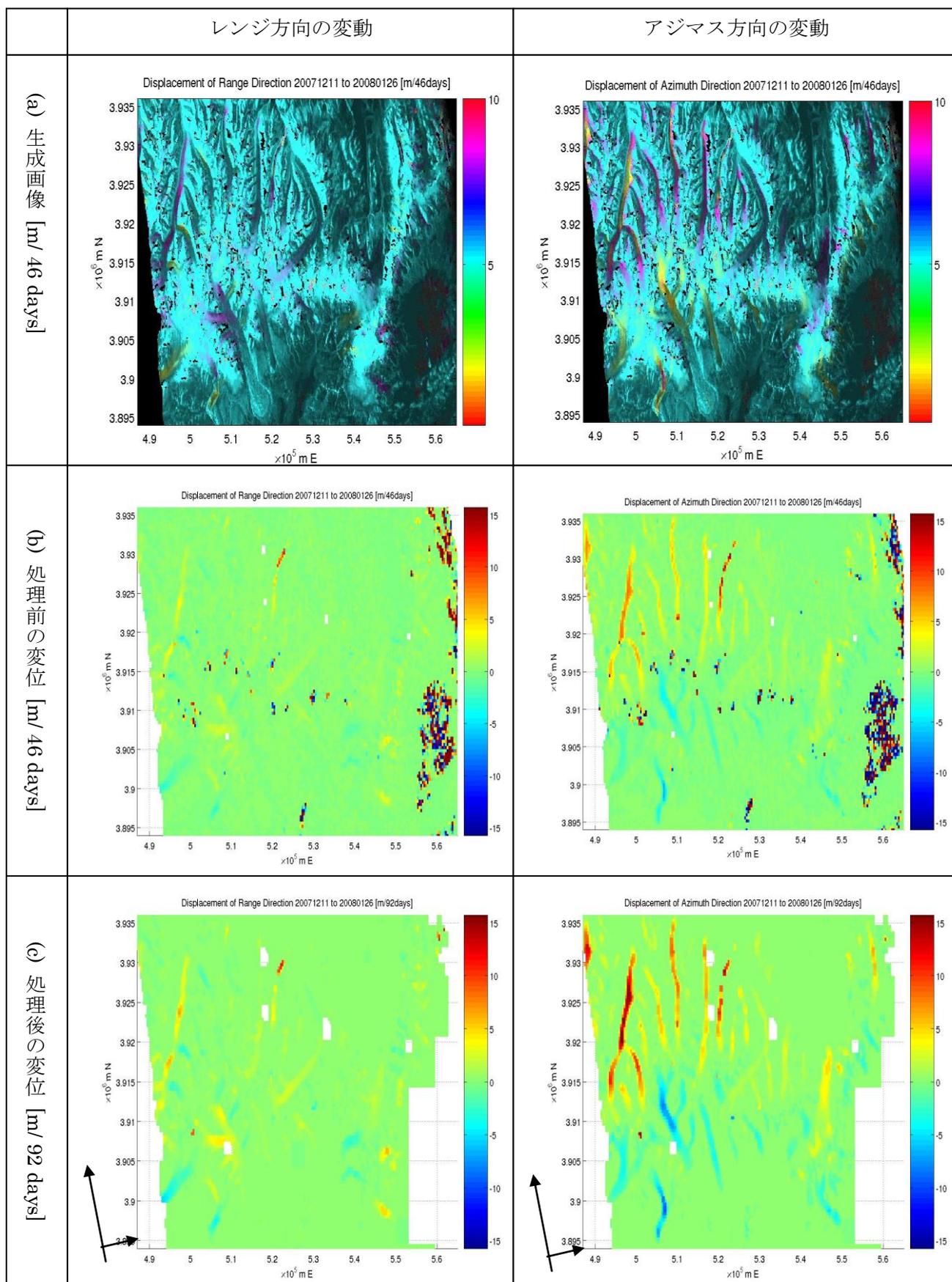


Fig. 3.5 20071211_20080126 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位

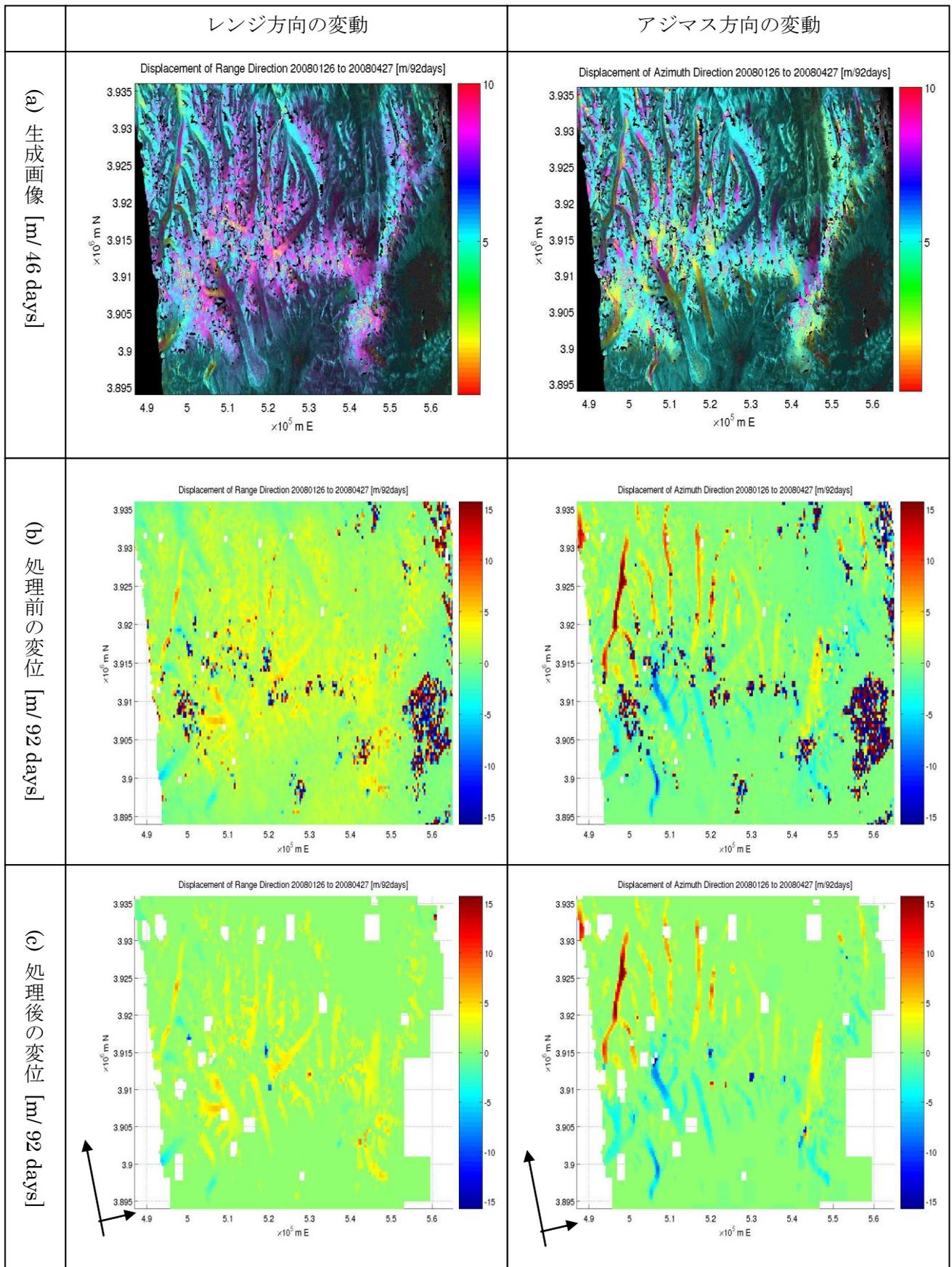


Fig. 3.6 20080126_20080427 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位

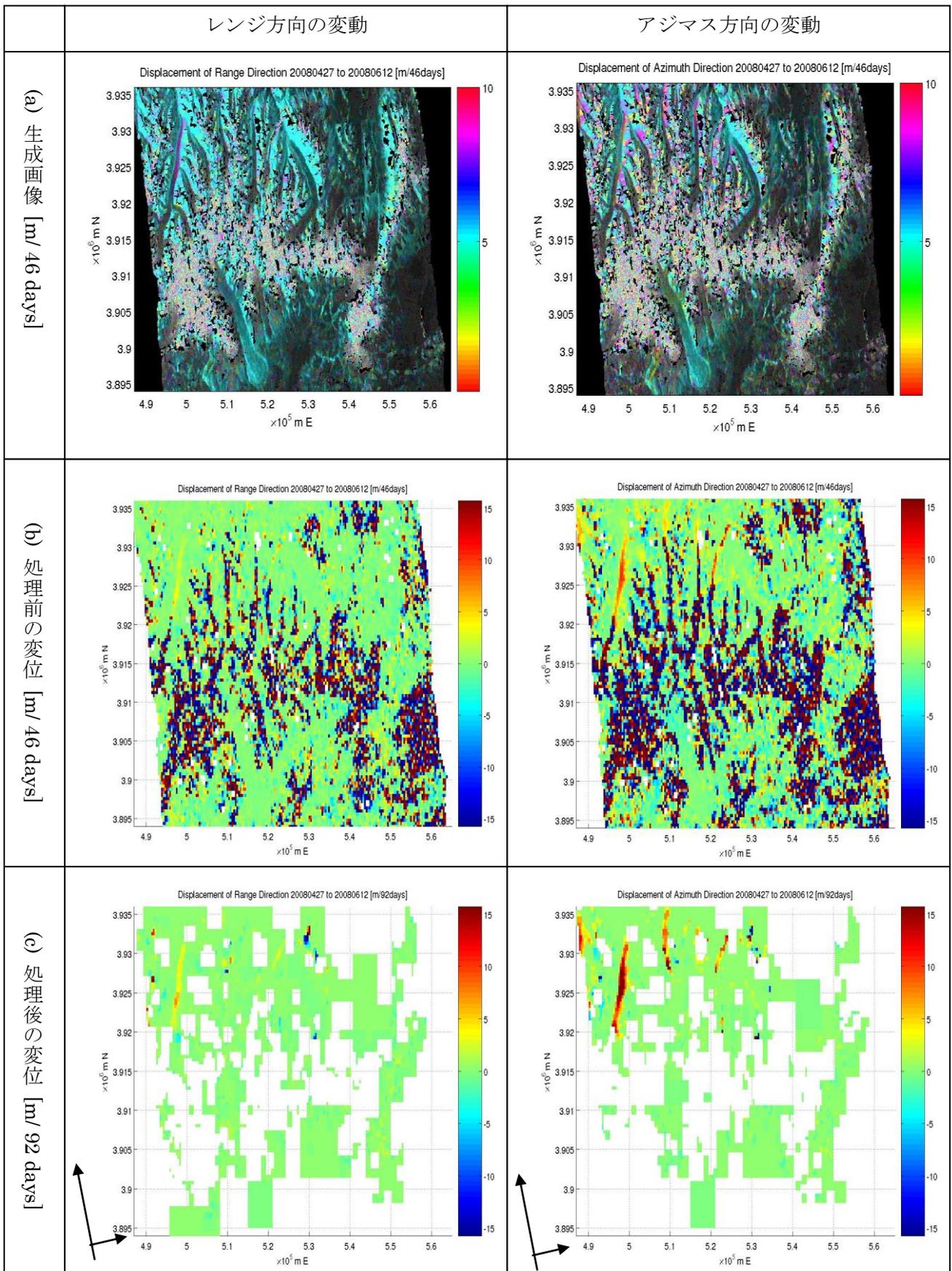


Fig. 3.7 20080427_20080612 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位

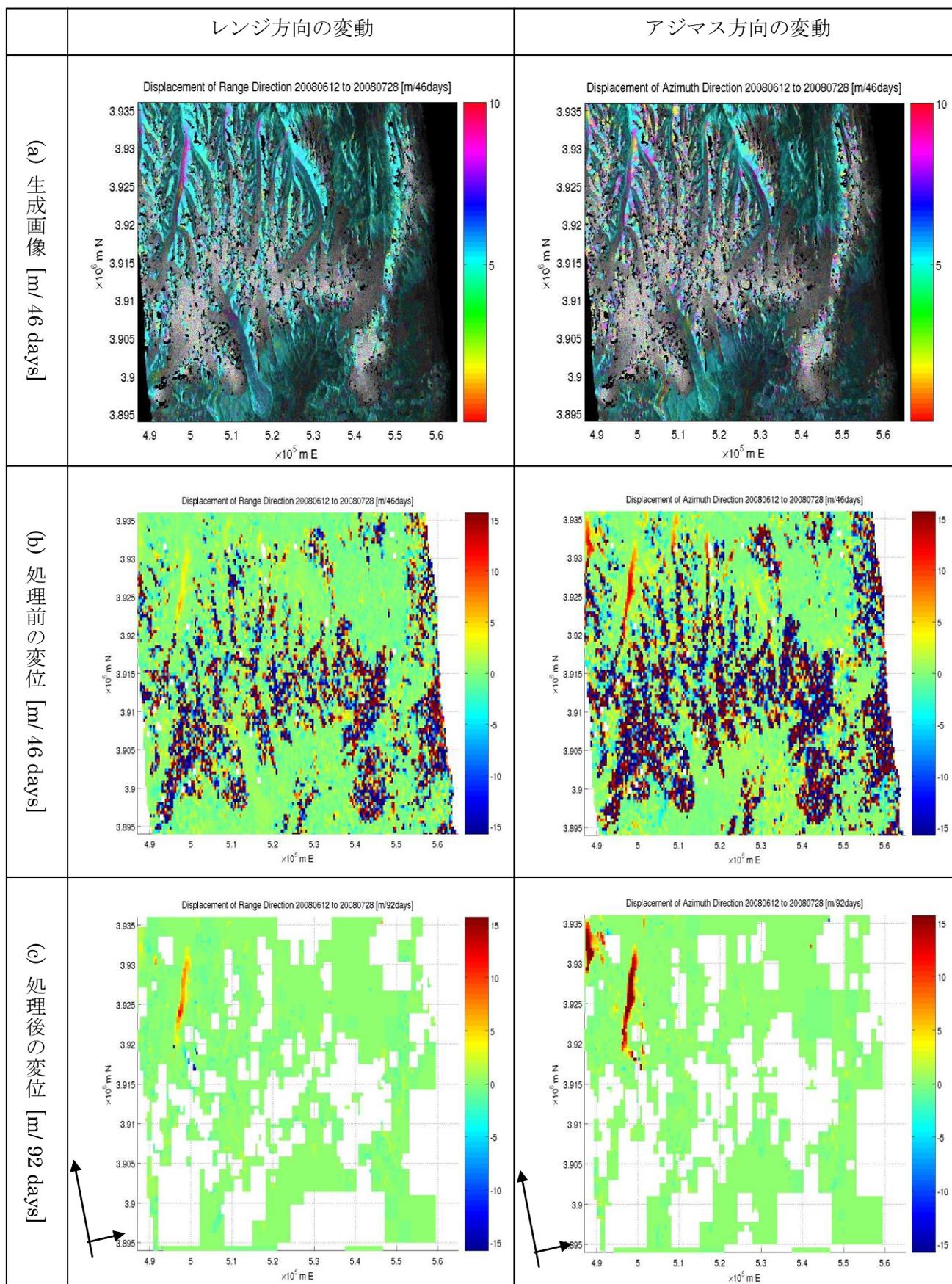


Fig. 3.8 20080612_20080728 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位

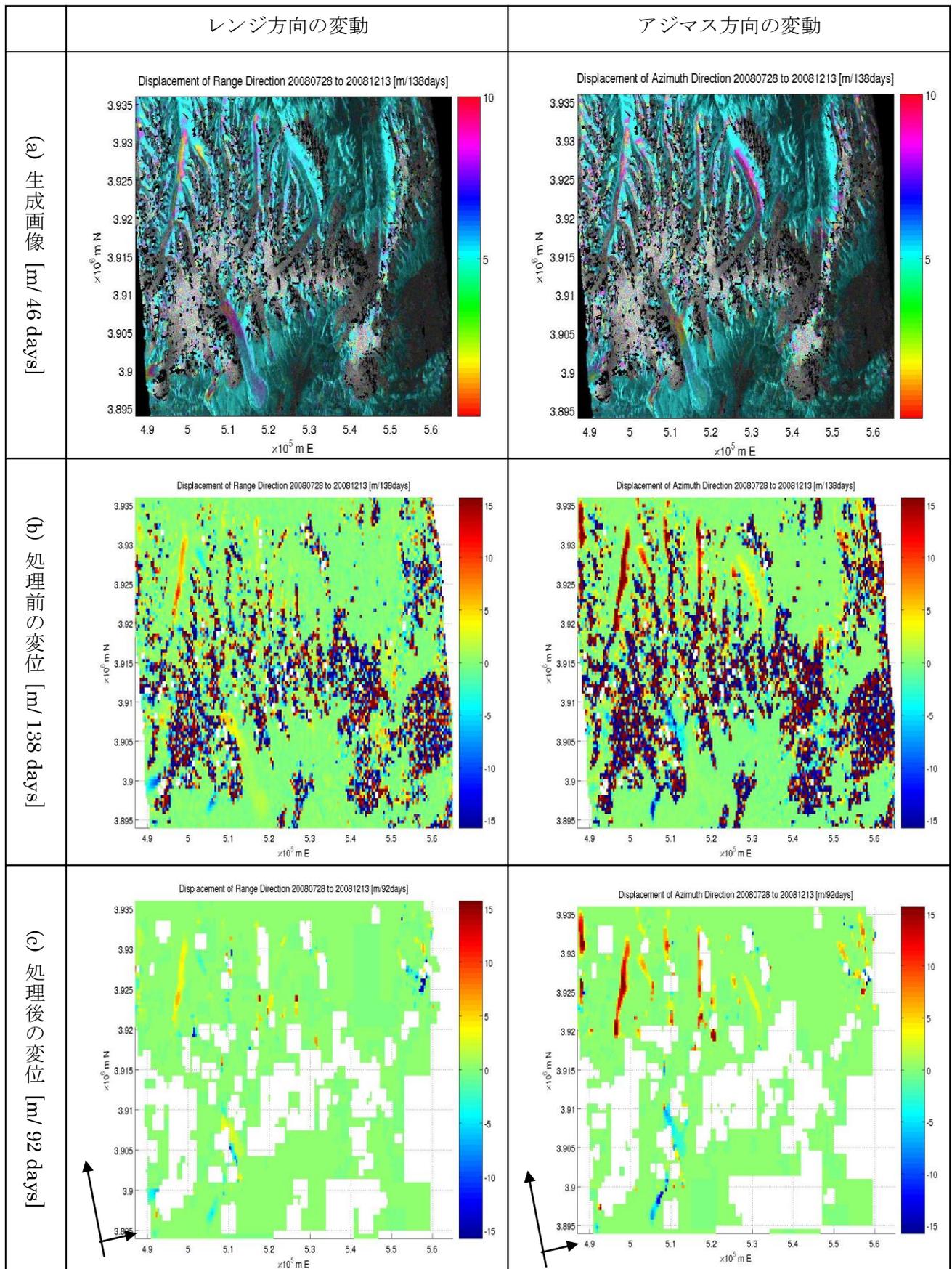


Fig. 3.9 20080728_20081213 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位

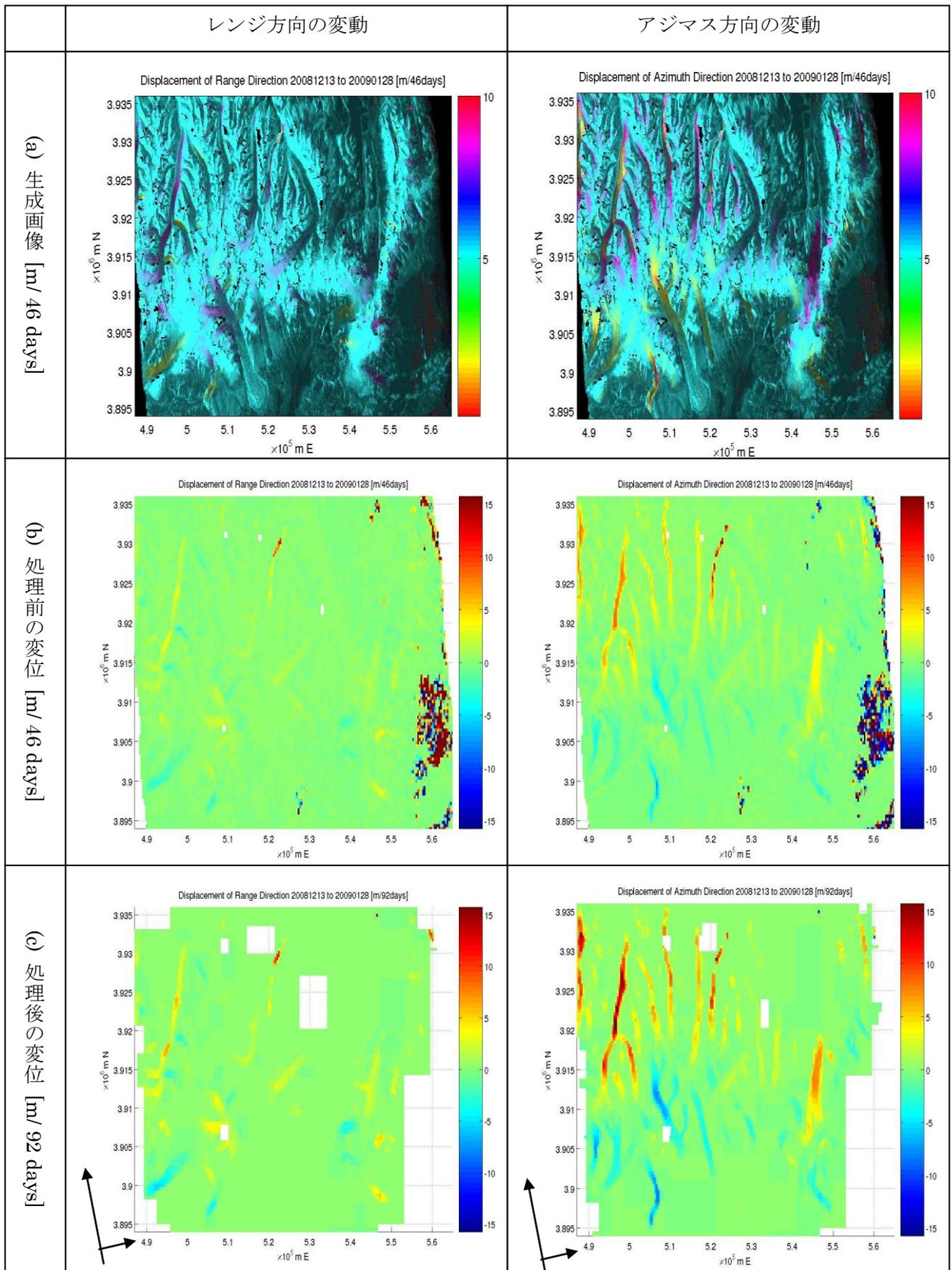


Fig. 3.10 20081213_20090128 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位.

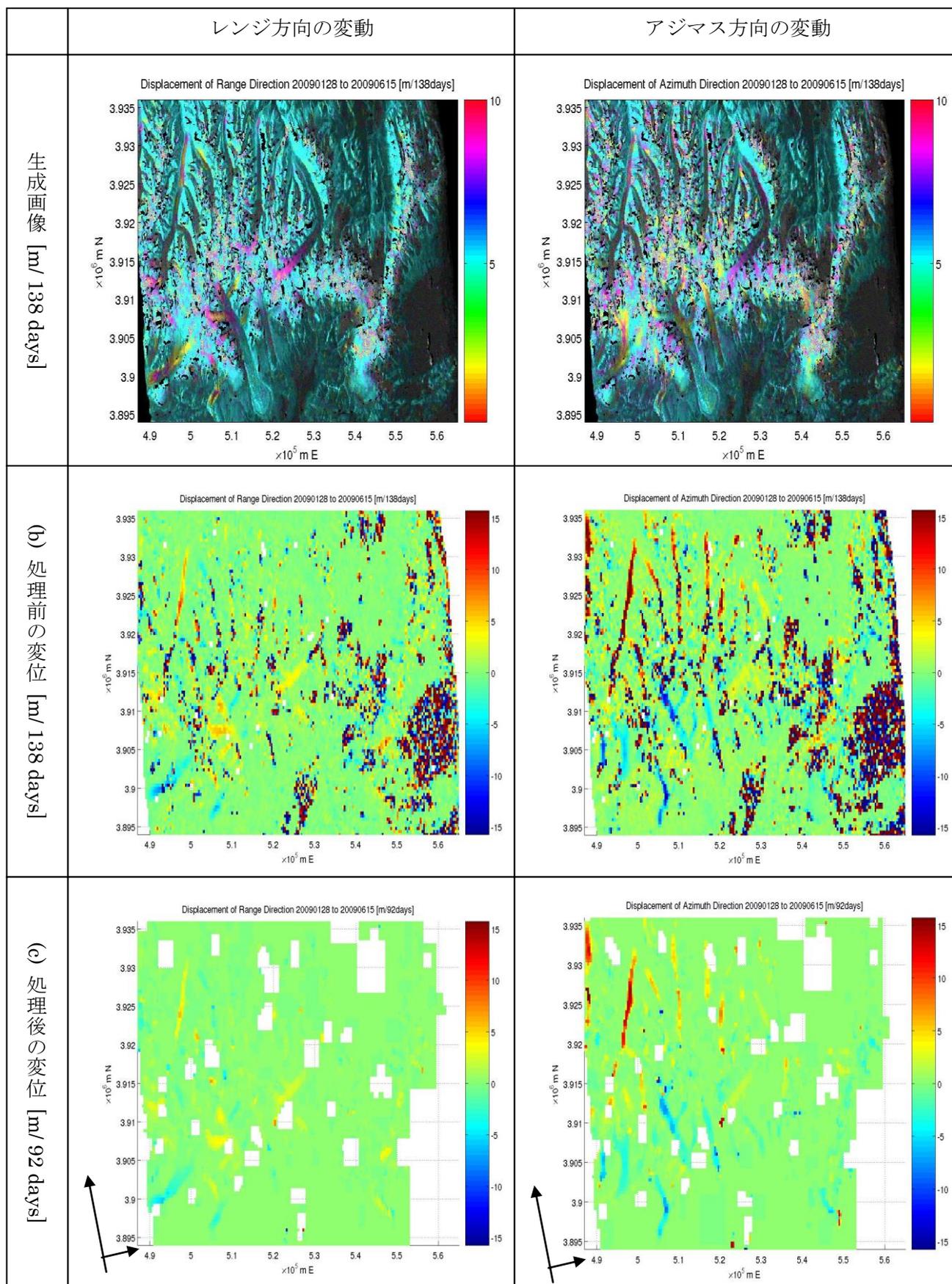


Fig. 3.11 20090128_20090615 の生成画像, 処理前の変位, 処理後の変位.

4. 考察

4.1 断層モデル

差分干渉法で検出された変動に加え、ピクセルオフセット解析で検出されたアジマス方向の変動をもとに Okada(1985,1992)を使いインバージョンを行った。観測結果を説明するためには二つの矩形断層 F1(north)と F2(south)を想定し、F2をF1より少し浅く設置して計算することでアジマス方向の変位も考慮したモデリングを行うことが出来た。しかし、それでも大きな残差が存在している(Fig4.3c)。より正確にこの断層を表現するためには矩形ではなく三角形の断層要素(e.g., Meade, 2007)を用いて曲がる地震断層をモデリングする必要がある。

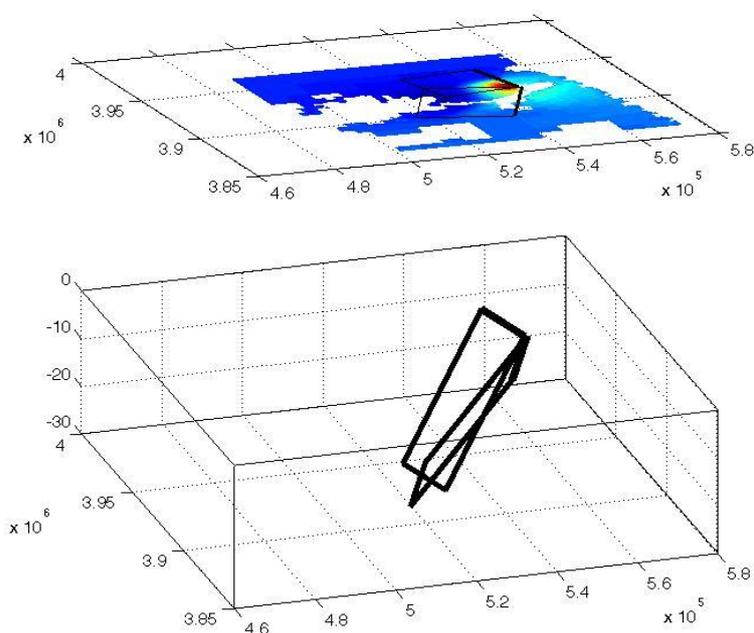


Fig. 4.1 断層の位置

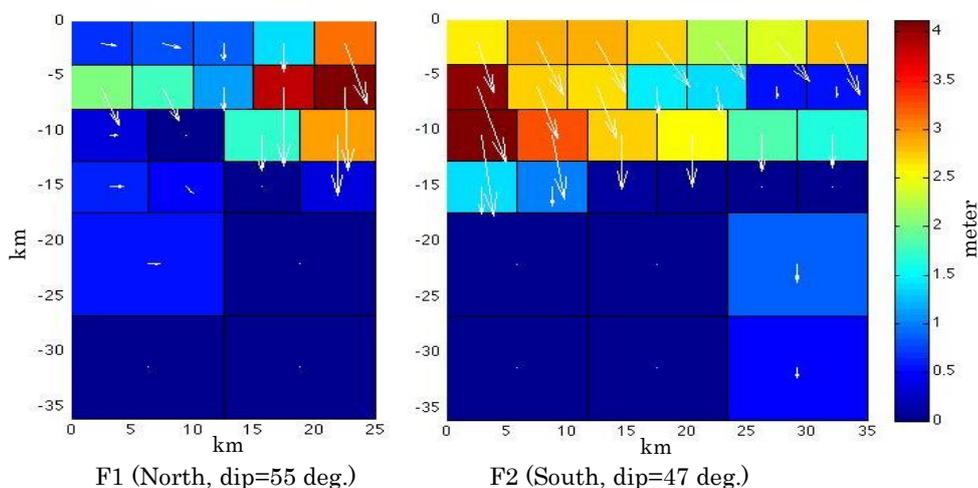


Fig. 4.2 推定される滑り量

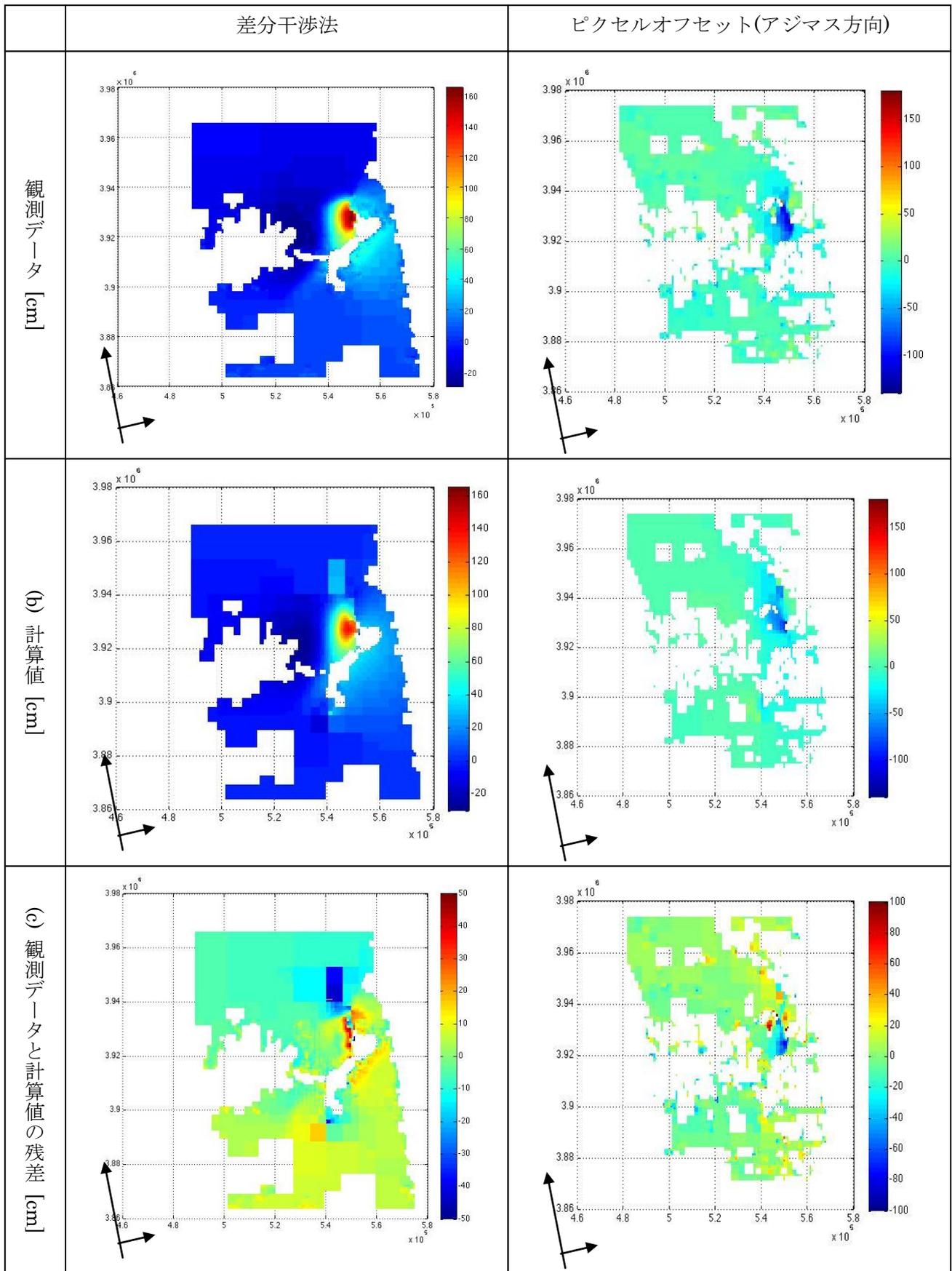


Fig. 4.3 観測値と計算値とその残差

4.2 氷河の変動

4.2.1 季節による変動の違い

観測期間を通じて氷河の変動量をみるためにFBD 同士でも変動を検出することが出来た山脈北側、観測エリアの西に位置する氷河 N1 に注目した。便宜上、観測エリア内の氷河は山脈の北側を N、南側を S であらわし、西から順に番号を振り呼称している。氷河は地形傾斜に沿って流動するのが妥当と考え、DEM のデータを用いて氷河に沿ったラインを設定した(Fig. 4.4)。Fig.4.5, Fig.4.6 は氷河 N1 の詳細である。変動量はレンジとアジマス速度の強度、矢印はその方向を示している。Fig.4.7 と Fig.4.8 では氷河 N1 と S2 を設定したラインに沿って変動量をプロットした。横軸が始点からの距離、縦軸がそれぞれ変動量を表している。氷河 N1 では観測期間を通じて変動を検出することが出来ているが、氷河 S2 では基線長が大きいペアでは有用なデータが得られていないことが分かる。氷河 N1 の速度を見てみると、標高 5000m から 6000m にかけて氷河の変動量が多くなっている。変動量は 2007 年 9 月以降増加、翌年 6 月から 7 月の夏季において速度は最大となり 25m を越す値が得られた。それ以降は減少に転じ 2009 年 1 月から 6 月の観測期間において速度の最大値は約 15m になった

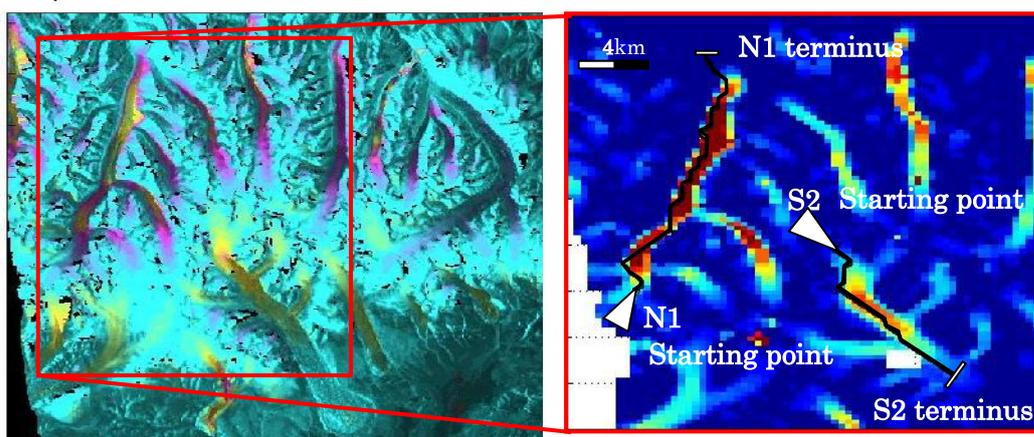


Fig. 4.4 氷河 N1 と氷河 S2 に沿ったライン

Pair	Date	Max [m/92days]	Mean [m/92days]
A	20070910_20071211	15.09	7.796
B	20071211_20080126	15.65	8.855
C	20080126_20080427	16.90	8.618
D	20080427_20080612	20.11	10.47
E	20080612_20080728	27.38	12.71
F	20080728_20081213	16.38	7.529
G	20081213_20090128	16.00	8.628
H	20090128_20090615	14.70	6.789

Table4.1 氷河 N1. ラインに沿った変動速度の平均値と最大値.
時間スケールは全て 92 日.

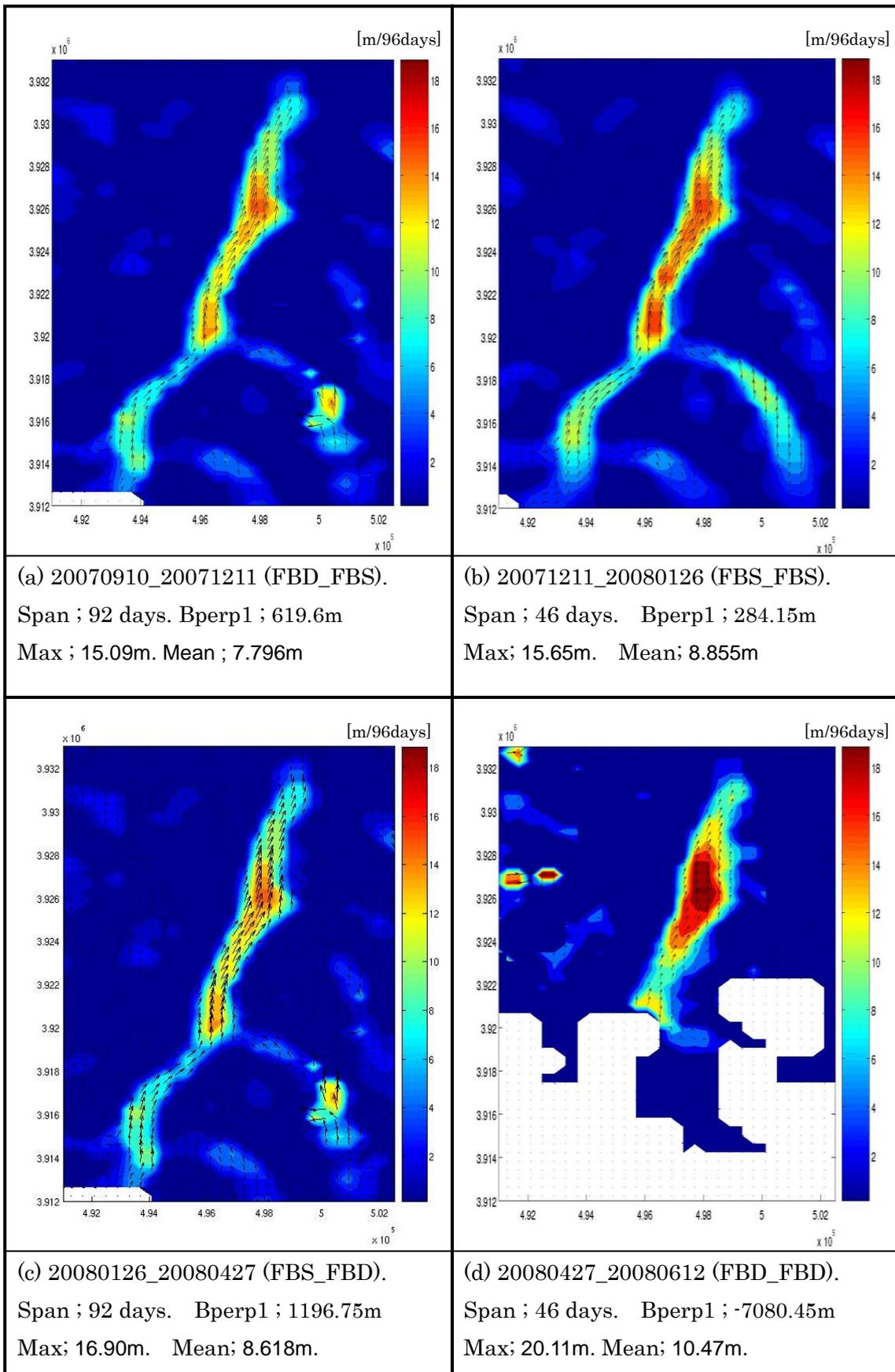


Fig. 4.5 氷河 N1 の変動速度の詳細 1 (2007 年 9 月～2008 年 6 月)

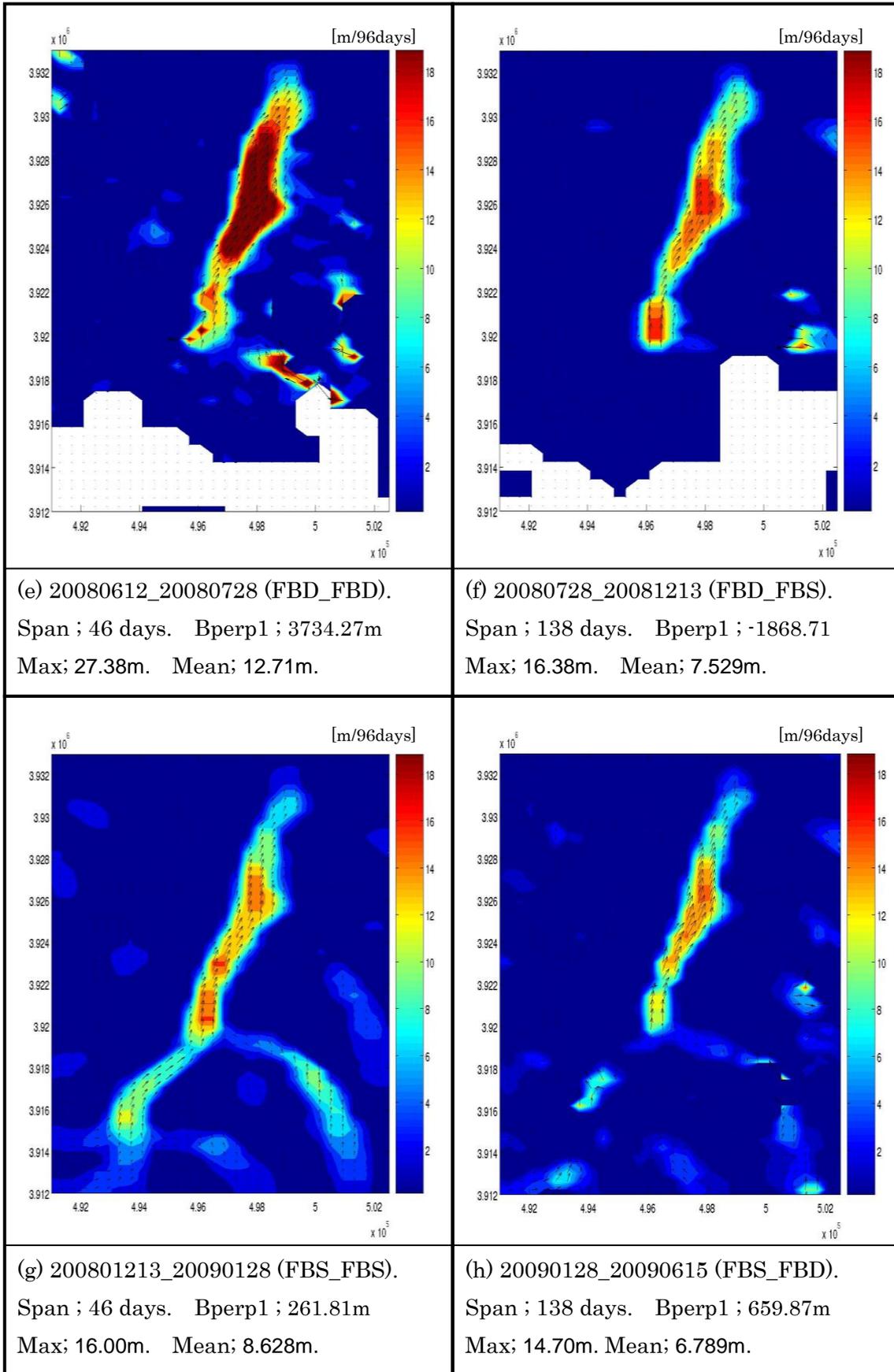


Fig. 4.6 氷河 N1 の変動速度の詳細 2 (2008 年 6 月～2009 年 6 月)

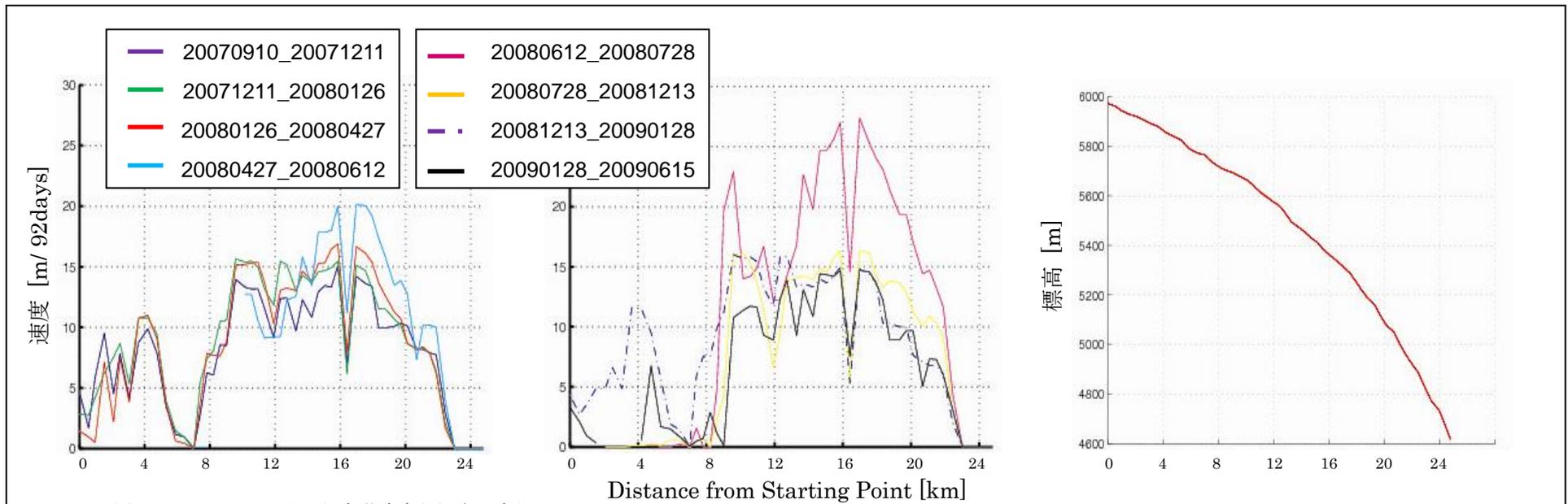


Fig. 4.7 氷河 N1 のラインに沿った変動速度と標高の変化

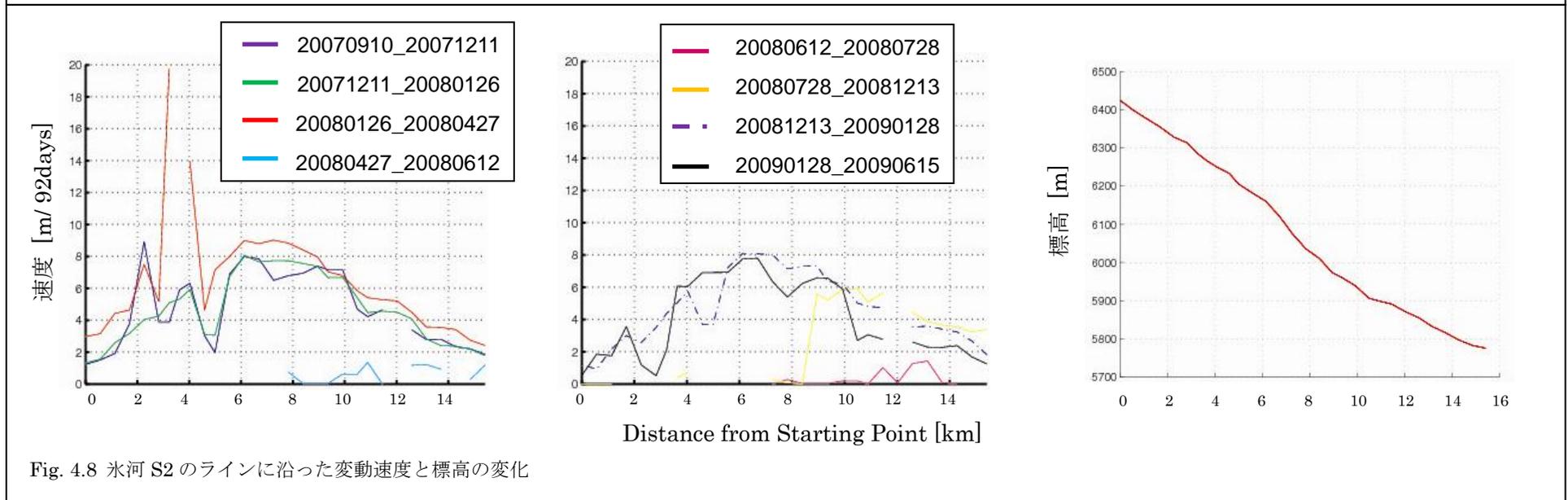


Fig. 4.8 氷河 S2 のラインに沿った変動速度と標高の変化

4.2.2 于田地震は氷河の速度を加速させたか

各データの変動の時間スケールを揃え検出に成功した氷河 N1 と S2 を比較したところ、于田地震により氷河の変動速度が影響を受けている、具体的には加速されている可能性が浮上した。氷河の流速は季節による影響が大きい(Table 4.2)。そのため同じ季節に取得されたデータを比較した(Fig.4.9, Fig.4.10)。まず地震の影響を含まないデータ B と G を比較し 2008 年と 2009 年の氷河の速度差を検証した。結果は氷河の流速平均の差は N1 で 0.227m、S2 では 0.04m であった。データ A と F で同様に調べると差は N1 で 0.27m であった。一方、地震による影響を含むと考えられるデータ C とその翌年のデータ H で氷河の平均流速を比較したところ、N1 では 1.83m、S2 で 2.48m であった。于田地震の影響がないときと比べると流速は明らかに加速している。データ B と G の差が 2008 年と 2009 年の速度差と仮定したならば、地震による変動は氷河 N1 で平均 1.60m、氷河 S2 で平均 2.44m になる。

Pair	Date	N1 [m/92days]		S1 [m/92days]	
		Max	Mean	Max	Mean
A	20070910_20071211	15.1	7.80	8.91	4.69
B	20071211_20080126	15.7	8.86	8.06	4.67
C	20080126_20080427	16.9	8.62	19.8	6.52
D	20080427_20080612	20.1	10.5	None	None
E	20080612_20080728	27.4	12.7	None	None
F	20080728_20081213	16.4	7.53	None	None
G	20081213_20090128	16.0	8.63	8.01	4.63
H	20090128_20090615	14.7	6.79	7.80	4.07

Table 4.2 氷河 N1 と S2 の最大速度と平均速度

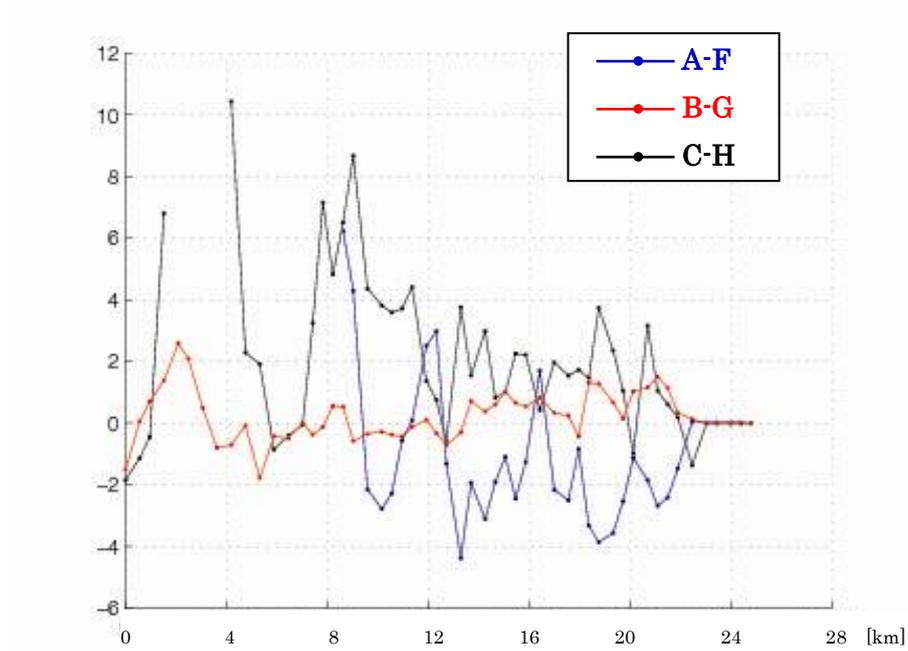


Fig.4.9 氷河 N1: ラインに沿った 2008 年と 2009 年の速度差. 基準は 2009 年
黒線が地震時のデータを含む.

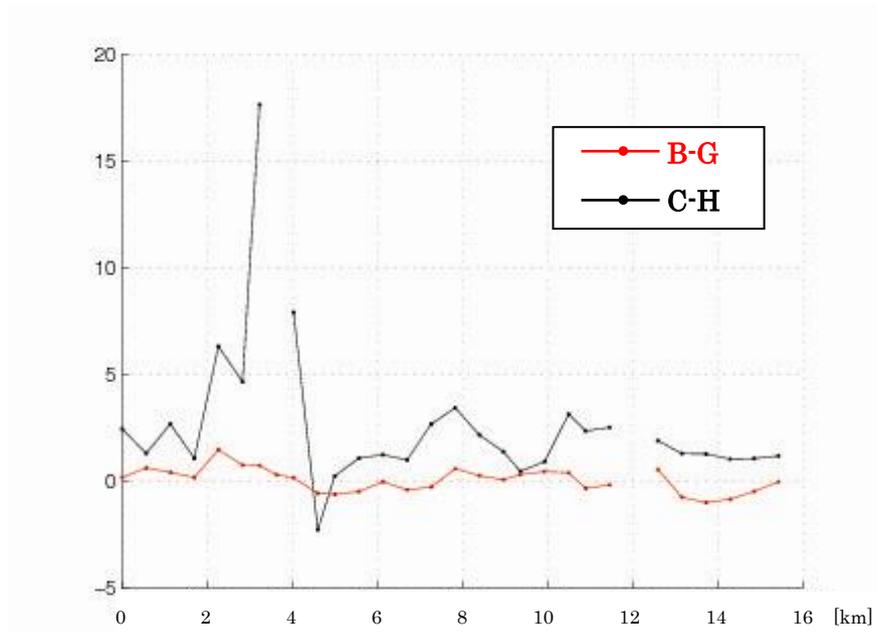


Fig.4.10 氷河 S2: ラインに沿った 2008 年と 2009 年の速度差. 基準は 2009 年
黒線が地震時のデータを含む.

5 まとめ

ALOS/PALSAR が 2007 年 9 月から 2009 年 6 月までのデータをもとに差分干渉法と強度トラッキングを使い、2008 年 3 月 20 日に発生した于田地震(Mw 7.1)の地震時地殻変動と崑崙山脈西端の山岳氷河の変動を観測することができた。

2008 年 1 月 26 日と 2008 年 4 月 27 日のデータをもとに差分干渉を行った結果、ある地点を境にして視線方向に対し東側で最大 180cm 遠ざかり、西側で 20cm 近づく正断層によるものと思われる変動を捉える事が出来た。ピクセルオフセット解析で得られた結果を解析したところ、レンジ方向では差分干渉法と同様の変動が検出され、アジマス方向では東側が南に 150cm を越える変動を検出した。観測結果をもとにインバージョンを行った。断層は単純な矩形ではなく曲がっていることが推定された。

時系列順のペアでピクセルオフセット解析を行った結果、基線長が 1000m 以内のデータの組み合わせで氷河の変動を検出することが出来た。一方、基線長が 1500m を越えるペアは Dem のエラー、特に雪氷に覆われた高山域で強く反映されてしまい変動を検出することはほとんど出来なかった。速度の時間スケールを 92 日にあわせ、一年を通じて観測できた氷河 N1 の速度をみることで季節による変化を捉える事が出来た。また于田地震が氷河の速度に与えた影響、速度を加速させている可能性について調査した。氷河の変動は季節による影響が大きいため同じ季節に取得されたデータの比較を行った。まず地震の影響を含まない時期のデータ比較し 2008 年と 2009 年の氷河の速度差を検証した結果、氷河の流速平均の差は N1 で 0.227m、S2 では 0.04m であった。また別の時期で同様に調べたところ差は N1 で 0.27m であった。一方、地震による影響を含むと考えられるデータとその翌年のデータで氷河の平均流速を比較したところ、流速平均の差は N1 で 1.83m、S2 で 2.48m であった。于田地震の影響がないときと比べると流速は明らかに加速していた。

6 課題

今後は氷河の解析を主題に研究を進めていく。今回得られた結論の信頼性を高めるため使用したデータのエラーの推定を行いたい。FBD 同士で基線長が長いペアは本当に SLC の段階で一度精査する必要がある。今回、氷河の変動はレンジ、アジマス方向の速度で表しているため、実態の速度をそのまま表したものではない。氷河の変動は地表面に平行と仮定し、DEM を用いて地形に沿った氷河の速度を検出したい。新たに得られたデータを加え、今後の研究を進めていきたい。

チベット高原北西部には、例えばキルギスなど、地震活動が活発でしかも近傍に山岳氷河が存在する領域がほかにもある。ここで習得した手法を他にも適用して、地震による氷床への影響をさらに調べたい。

7 謝辞

本研究で用いた PALSAR データは PIXEL において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものである。PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にある。本研究の一部は、東京大学地震研究所特定共同研究 (B) 「SAR を用いた地震火山活動に伴う地殻変動の検出」で行われた。

本研究を進めるためご指導を頂いた古屋先生に感謝を述べさせていただきます。何もわからなかった初めより様々なことを丁寧にお教えいただきありがとうございました。夏には研究会に参加させて頂けたり、とても充実した学部 4 年を過ごすことが出来ました。至らぬ点ばかりですが、これからもよろしくお願い致します。

8 参考文献・画像引用

- Furuya, M., Yasuda, T., and Bihong Fu (AGU 2009)
: Co-seismic deformation due to the 20 March 2008 Yutian 于田 earthquake (M7.2) in Tibet and its Fault Model
- Furuya, M., (2006)
: InSAR: A New Trend in Crustal Deformation Measurement (review article in Japanese with abstract and captions in English), *J. Geod. Soc. Jpn.*, vol. 52, no. 4, 225—243
- Guangfu Shao and Chen Ji (2008), www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/home.html
: Preliminary Result of the Mar 20, 2008 Mw 7.14 Xinjiang Earthquake
- Okada, Y.(1985)
: Surface Deformation Due To Shear and Tensile Faults In a Half-space, *BSSA*, Vol. 75, No. 4, pp. 1145-1154.
- Okada, Y.(1992)
: Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, *BSSA*, 82, 1018-1040.
- Adrian Luckman, Duncan Quincey, Suzanne Bevan (2007)
: The potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates of Himalayan glaciers, *Remote Sensing of Environment* 111, 172-181.
- Massonnet, D., Rossi, M., C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabouet(1993)
: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, 138-142.
- Tazio Strozzi, Adrian Luckman, Tavi Murray, Urs Wegmüller, Charles L. Werner (2002)
: Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11*.
- Meade (2007), *Comp. Geosci.*, 33, 1064-1075, doi 10.1016/j.cageo.2006.12.003.
- Jonsson et al. (2002), *BSSA*, 92(4), 1377-1389, doi 10.1785/0120000922
- 飛田幹男・藤原 智・村上 亮・中川弘之・矢来博司 (2001)
: SAR 画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動, 変動速度, 体積変化, 国土地理院時報 No.95.
- 大内和夫(2004)
: リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 東京電機大学出版局

(C) JAXA (<http://www.jaxa.jp/>)
Google earth (<http://earth.google.com>)