

ALOS/PALSAR に基づく

キルギス地震(Mw6.7)に伴う地殻変動と

Perito Moreno 氷河(パタゴニア)の流動の検出

Detection of Crustal Deformation and Glacier Flow
by ALOS/PALSAR: the Kyrgyz earthquake (Mw 6.7)
and Perito Moreno Glacier, Patagonia Icefield

北海道大学 理学部 地球科学科 4年

宇宙測地学研究室

22070047

武藤 みなみ

Minami Muto

指導教官 古屋 正人

概要

近年の宇宙測地技術の発展により、現在では衛星を利用した様々な方法で地表の観測が可能となっている。地表変動を測るのに有効な宇宙測地技術の一つとして、合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar; SAR)がある。本研究では、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 の観測データを用いて、地殻変動と氷河の流動という二つの地表変動を検出した。

一つ目の研究テーマとして、2008年10月5日にキルギスで起こった Mw6.7 の地震について解析を行った。差分干渉法と Pixel Offset 法という2つの手法を併用することにより、逆断層型地震による地殻変動を検出することができた。さらに、その結果をもとに半無限弾性体を仮定した断層モデルを推定した。

二つ目のテーマとして、パタゴニアの Perito Moreno 氷河の流動を検出した。地球温暖化が問題となっている今、氷河の挙動への関心は高まっている。さらに、氷河の挙動を理解することは地球の気候システムを理解することにもつながる。しかし、多くの場合氷河は遠隔地にあるため、時間的・空間的に密に監視され続けている氷河は非常に少ない。Perito Moreno 氷河に関する衛星観測データを用いた研究はこれまでもいくつか報告されているが、ALOS/PALSAR を用いた研究はまだ報告されていない。本研究では、ALOS/PALSAR の観測データを用いて Pixel Offset 解析を行い、氷河の流動を検出した。さらに、これまでの研究では氷河が地形に沿って流れるという仮定のもと流動方向を決定していたが、本研究では異なる軌道の2組の解析結果を用いることで地形情報に頼らずに三次元変位を推定した。

目次

1. はじめに	1
1.1 衛星による測地	1
1.2 合成開口レーダー	2
1.2.1 SLC 画像の作成	3
1.2.2 干渉 SAR	5
1.2.3 Pixel Offset 法	8
1.2.4 SAR で検出される変動量	8
1.3 ALOS/PALSAR	9
1.4 本研究の目的	10
2. キルギス地震に伴う地殻変動の検出と断層モデルの推定	11
2.1 観測地域	11
2.2 使用したデータ	12
2.2.1 ALOS/PALSAR のデータ	12
2.2.2 数値標高モデル(Digital Elevation Model; DEM)	12
2.3 解析方法	13
2.4 結果	13
2.4.1 差分干渉法の結果	13
2.4.2 Pixel Offset 法の結果	15
2.5 考察	17
2.5.1 断層モデルの推定	17
2.5.2 断層の滑り分布	19
2.6 まとめ	20
2.7 今後の課題	21
3. Perito Moreno 氷河 (パタゴニア) の三次元変位の推定	22
3.1 観測地域	22
3.2 SAR の観測データを用いた先行研究	23
3.3 使用したデータ	25
3.4 解析方法	25
3.5 結果	26
3.5.1 Pixel Offset 解析の結果	26
3.5.2 三次元変位の推定	27
3.6 考察	29
3.6.1 流動速度の空間分布	29
3.6.2 地形から推定した流動速度	31

3.7	まとめ	33
3.8	今後の課題	33
4.	謝辞	34
5.	参考文献	35

1 はじめに

1.1 衛星による測地

近年の宇宙測地技術の発展にともない、1970年代以降、VLBI(Very Long Baseline Interferometry), SLR(Satellite Laser Ranging), GPS(Global Positioning System)といった位置計測技術が次々に実用化されてきた。これにより、以前は三角測量や天文観測によってしか測れなかった位置情報が、今では宇宙からの観測により、高い時空間分解能で得られるようになった。これらの宇宙測地技術はいずれも地球上の2点間の距離(基線長)を測定するもので、特にGPSは高い時間分解能で地表の変化を観測することができる。しかし、これらの短所として、いずれも地上に電力供給が必要な観測点が必要であることが挙げられる。よって、事前に発生する場所がわからない地震による変動や、険しい環境にある氷河の流動を観測したい場合などには適用が難しい。

そうした中、位置計測に関連した宇宙測地学技術の一つとして、合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar; SAR)の利用が注目されている。SARは、マイクロ波を地表へ向けて照射し、地表からの反射波を受信することにより、昼夜・天候にかかわらずに地表を観測することができる。さらに、時期の異なるSAR画像を干渉させること(干渉SAR)により、地上観測点を置くことなく、高い空間分解能で変動を検出することが可能である。GPSでは偏在する観測点での変位を測定することしかできないが、SARではマイクロ波が照射される面全体という広範囲の観測が可能なので、画像として変位分布を得ることができる。

これらの利点により、現在までにSARを用いた地殻変動や氷河の流動の検出は数多く報告されている。このことは、地表変動の検出に対するSARの有用性を示している。

1.2 合成開口レーダー

合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar; SAR)とは、人工衛星などに搭載したアンテナを用いて地表に対するマイクロ波の照射と反射波の受信を連続的に行い、空間上にあたかも巨大なアンテナが存在しているかのように、高い分解能で地表の画像を得る技術である。レーダーにより得られるデータの地上分解能はアンテナの大きさに比例する。しかし、衛星に搭載できるアンテナのサイズには限界がある。そこで、軌道上を移動しながら何度も送受信を行い、受信した反射波を、ドップラー効果を考慮した上で合成することによりアジマス方向の分解能を上昇させている。ここで、アジマス方向(Azimuth direction)とは衛星の進行方向のことである。これに対し、衛星の視線方向をレンジ方向(Range direction)といい、レンジ方向の分解能向上のためにはチャープパルスが利用されている。

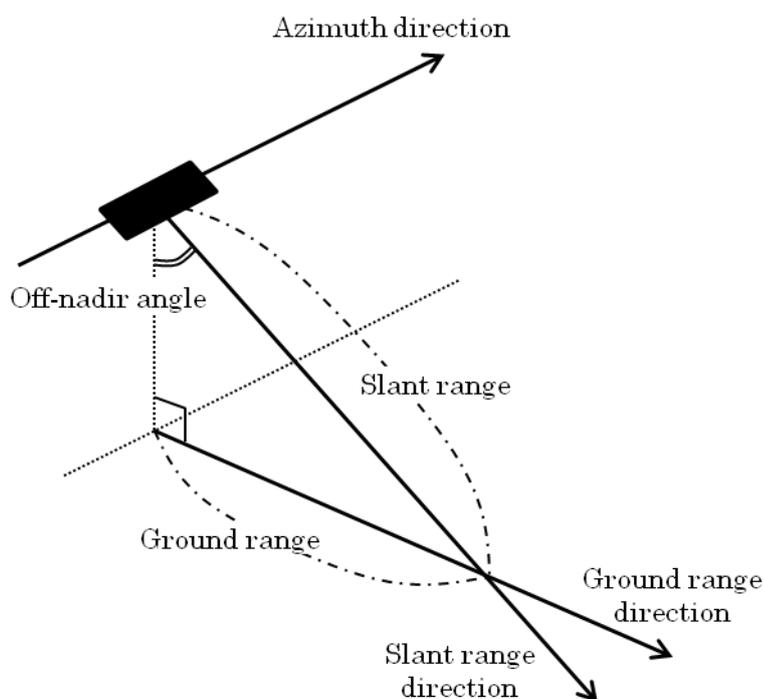


図1 SARにおけるジオメトリ

マイクロ波の照射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(Off-nadir angle)、スラントレンジを地上に射影した方向をグラントレンジ(Ground range)という。

1.2.1 SLC 画像の作成

SAR の受信生データはそのまま見ただけでは何もわからない。この生データを処理して最初に得られる画像が、SLC 画像(Single Look Complex Image)である。ここでは、SAR の生データとはどんなものか、そしてそこからどのようにして SLC 画像が作成されるかを述べる。

SAR の生データについて述べる前に、レーダーが発信しているパルスについて説明する。地上に 2 つの散乱体 A・B があるとしたとき、より近い距離の A・B を区別するためにはパルスを短くすればよい(図 2)。しかし、パルスを短くするためには大きな出力が必要となり、電力的に制限がある衛星上では困難である。

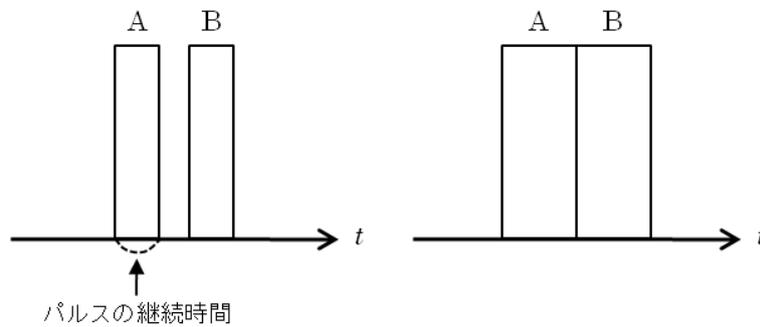


図 2 パルスの長さ と Range 方向の分解能の関係

左図では散乱体 A, B を区別できるが、右図では区別することができない。

そこで、Range 方向の分解能を高めるために導入されているのがチャープパルスによるパルス圧縮技術である。チャープパルスは式で書くと次のようになる。

$$v(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cos\{2\pi(f_c t + K_r t^2/2)\} \quad (1)$$

ここで、 T_p はパルスの継続時間、 f_c は中心周波数[GHz]、 K_r はチャープ率、 $\text{rect}(t/T_p)$ は長さ T_p の矩形関数を表す。位相部分を時間微分するとわかるように、周波数が時間の一次関数となっている。時間 T_p 中での周波数の変化幅をバンド幅といい、以下のように定義される。

$$B_w^r \equiv K_r T_p \quad (2)$$

B_w^r は数 10MHz 程度なので、見かけ上はほぼ正弦波と同じであるように見えるが、このわずかな違いが重要となる。センサーからの距離 R の地点に散乱体が 1 つだけある場合を考えると、 $t_0 (= 2R/c)$ 秒後に返ってくる反射波は次式で表される。

$$v_r(t) \propto \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \cos\{2\pi(f_c(t-t_0) + K_r(t-t_0)^2/2)\} \quad (3)$$

これがセンサーの最初の受信データである。しかし、このままだと周波数が高く記録が大変なので、高周波成分は落とされ、低周波成分のみが複素データとして記録される。

$$v_r^*(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \exp\left\{-j\frac{4\pi R}{\lambda}\right\} \exp\{j\pi K_r(t-t_0)^2\} \quad (4)$$

これが Range 成分の生データとして衛星に記録される。しかし、この受信データはノイズを多く含んでいるため、ここから本来の反射波のみを抽出するために整合フィルター (Matched filter) をかける。その結果、次式が得られる。

$$v_{out}(t) = T_p \text{sinc}\left(K_r T_p(t-t_0)\right) \quad (5)$$

ここで、 $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ である。チャープパルスを用いない場合 (パルス幅 T_p) の Range 方向の分解能 Δr は、

$$\Delta r = \frac{cT_p}{2} \quad (6)$$

で表されるが、チャープパルスを用いるとパルス幅は $1/K_r T_p$ となるので、分解能は

$$\Delta r = \frac{c}{2K_r T_p} \quad (7)$$

となる。式から明らかなように、チャープパルスを用いない場合に比べると $K_r T_p^2$ 倍に圧縮されており、Range 方向の分解能が確かに向上していることがわかる。

ここまでは Range 方向についてのみ述べたが、Azimuth 方向についてもまた、高分解能実現のために Range 方向と似たような技術が用いられている。冒頭で述べたように、Azimuth 方向の分解能 Δa はアンテナの Azimuth 方向の長さ L に比例する。結果の式のみ書くと、Azimuth 方向の分解能は

$$\Delta a = \frac{L}{2} \quad (8)$$

で与えられ、衛星の高度や波長などによらない。これは SAR において最も有名な式である。この式からわかるように、分解能を向上させるためにはアンテナの長さ L を大きくすればよい。そこで、連続的にマイクロ波を照射しながら移動することにより、仮想的にアンテナの大きくするという合成開口の技術が用いられている。それに加えて、ドップラー効果を考慮した上で Range 方向の場合と同様な圧縮処理を行うことによって、Azimuth 方向の高分解能化が実現されている。

SAR の受信生データにこれらの圧縮処理を行い、最初に得られる画像が SLC 画像である。SLC 画像は複素数データであり、その実部と虚部の二乗和の平方根で求められる反射強度を画像にしたものが強度画像である (図 3)。受信生データからここまでの処理をまとめると、図 4 のような手順になる。

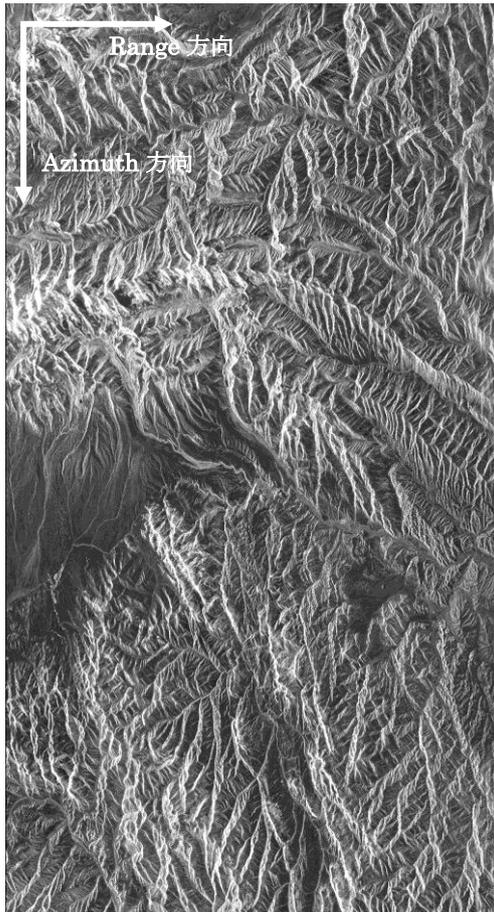


図3 SAR のデータから作成される強度画像

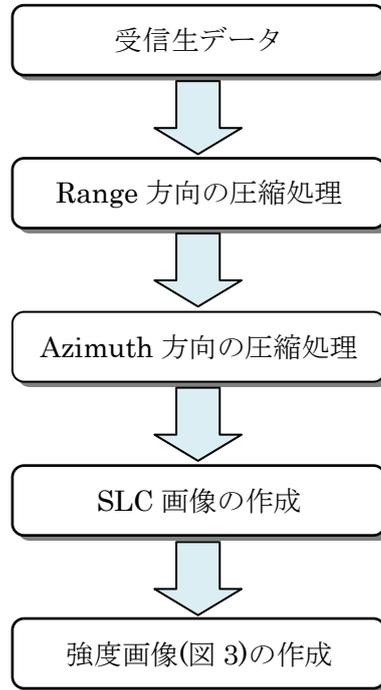


図4 生データから強度画像作成までの流れ

1.2.2 干渉 SAR

干渉 SAR(Interferometric SAR; InSAR)とは、観測時期が異なる 2 枚の SLC 画像を用いて、その位相差から地表変動を検出する手法である。その原理は、光が干渉という波に特徴的な性質をもつことを示した「ヤングの実験」(図 5)で理解できる。位相がそろっている波が、スリット S_1 、 S_2 を通過してスクリーンに当たると、光路差に応じて同位相のところでは強めあって明るくなり、逆位相のところでは打ち消しあって暗くなる。その結果、壁には縞模様が現れる。

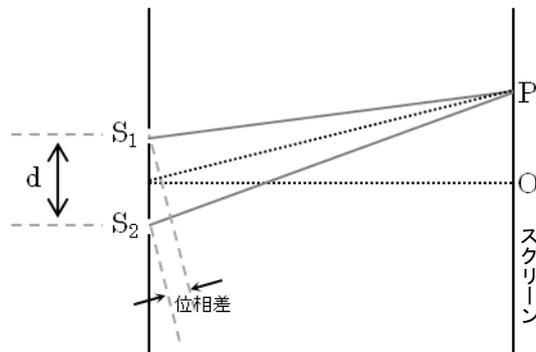


図5 ヤングの実験

干渉 SAR についても、このヤングの実験と同様に考えることができる。位相のそろった波がマイクロ波、2つのスリットが観測時期の異なる衛星の位置、スクリーンが地表に相当する。干渉 SAR 画像には、2つのデータの位相差による干渉縞が現れる。しかし、単に位相差といってもヤングの実験のように単純ではなく、位相差がおこる原因は複数ある。まず、地形が平坦な場合には、ヤングの実験のスクリーンで見られるのと同様に平行な縞模様（軌道縞とよぶ）がみられる。一方、地形起伏がある場合には、その地形に応じてゆがんだ干渉縞（地形縞とよぶ）がみられる。さらに、2回の観測時期の間に地震などにより地表で変動がおこると、その変動が変動縞となって現れる。

干渉画像の作成には、まず2枚のSLC画像の位置合わせが必要となる。2枚ともほぼ同じ観測範囲を見ているとはいえ、完全に一致してはいないので、これをしないと干渉画像が得られない。

位置合わせができると、初期干渉画像が得られる。この時点で干渉画像には軌道縞、地形縞、変動縞のすべてが含まれている。欲しい情報は変動縞のみなので、ここから軌道縞と地形縞を除去する必要がある。まず、軌道縞は衛星の軌道情報から計算することにより取り除くことができる。このとき、基線長（衛星間距離）が長いと干渉画像を得られないことがあるので、注意が必要である。次に、地形縞については数値標高モデル（詳しくは2.2.2項で解説）の地形情報から計算して取り除くことができる。これらの段階を踏むことにより、変動縞のみを示した干渉画像が得られる。しかし、この時点での干渉画像の位相データは、位相の絶対値ではなく位相を 2π で割った余りであるため、 2π の任意性を含んだ状態となっている。この 2π の任意性を取り除くためには、位相アンラッピング(phase unwrapping)とよばれる処理を行う。そして最後に、SARの観測データはすべてRange-Azimuth座標となっているので、これを普段見慣れたUTM(Universal Transverse Mercator)座標へと変換する作業を行う。こうして最終的な干渉画像が得られる。

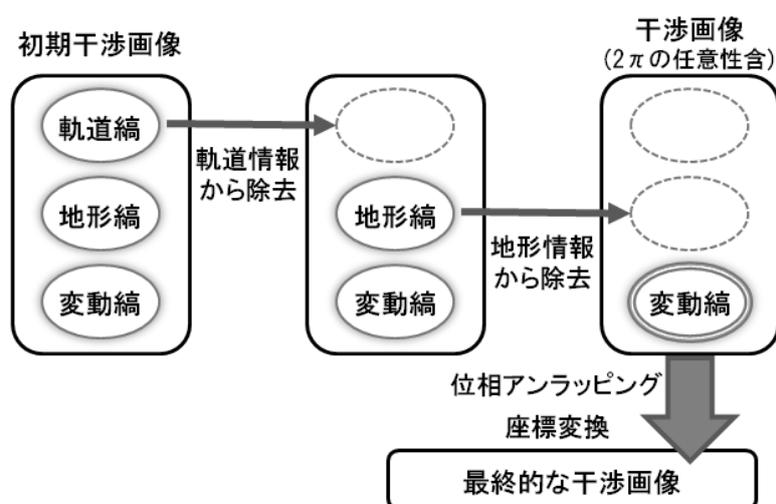


図6 干渉画像作成の流れ

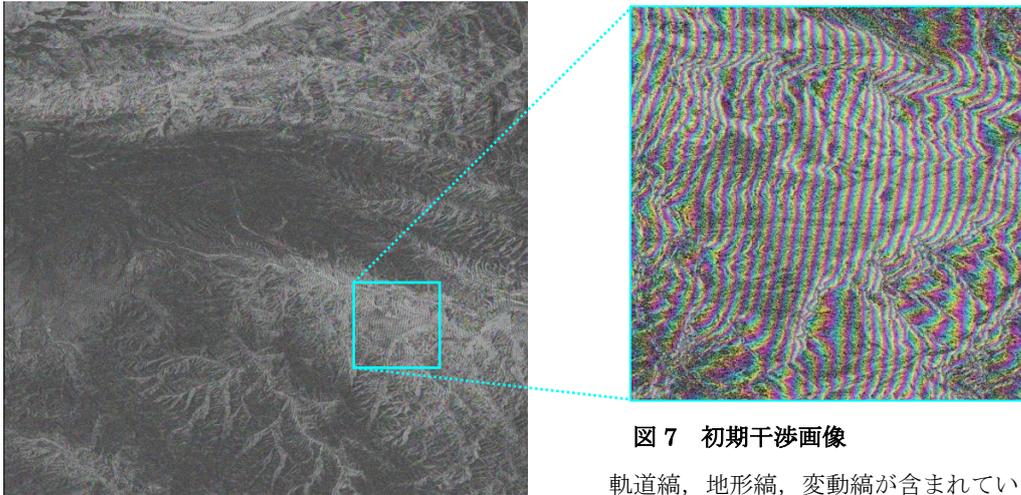


図7 初期干渉画像

軌道縞，地形縞，変動縞が含まれている。

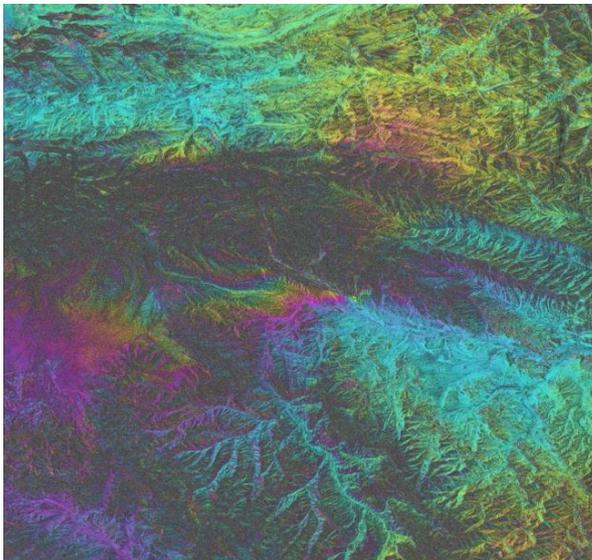


図8 軌道縞と地形縞を除去した干渉画像

図7から軌道縞と地形縞を除去したもの。

まだ 2π の任意性が残っている。

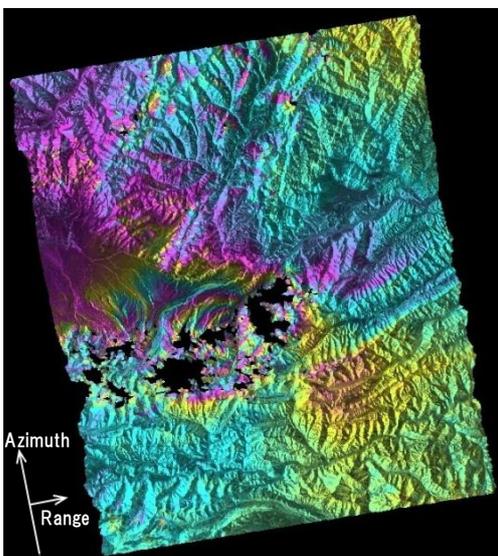


図9 最終的な干渉画像

図8の画像に位相アンラッピングを施し，

UTM座標に変化したもの。

1.2.3 Pixel Offset 法

SAR 画像を用いて地表変動を検出する手法として、干渉 SAR のほかに Pixel Offset 法がある。Pixel Offset 法は 1.2.2 項で触れた位置合わせが派生したもので、2 枚の SAR 画像の各ピクセルを比較し、そのずれを抽出する手法である。干渉 SAR は大きな変動が起こると干渉縞が密集して位相アンラッピングができなくなってしまうのに対し、Pixel Offset 法はメートル単位の大きな変動の検出に適している。さらに、Range, Azimuth 方向の 2 成分について変動量が得られるのもこの手法の長所である（干渉 SAR では Range 方向のみ）。ただし、干渉 SAR に比べると精度は低くなる。

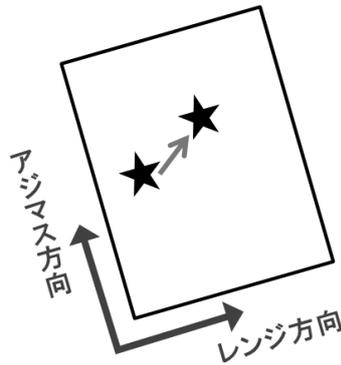


図 10 Pixel Offset 法

1.2.4 SAR で検出される変動量

差分干渉法と Pixel Offset 法により検出される変動量は、地表における三次元変位を Range, Azimuth の各方向に射影したものである。Range, Azimuth 方向の変動量をそれぞれ U_{ran} , U_{azi} とする。変動の東西成分 U_E , 南北成分 U_N , 鉛直成分 U_Z , 真北から時計回りに衛星の進行方向を測った角度(Heading 角) H , マイクロ波の地表への入射角 I を用いて U_{ran} , U_{azi} を表すと、以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} U_{ran} \\ U_{azi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos H \sin I & -\sin H \sin I & -\cos I \\ \cos H & \sin H & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_E \\ U_N \\ U_Z \end{pmatrix} \quad (9)$$

干渉 SAR と Range 方向の Pixel Offset からは U_{ran} が、Azimuth 方向の Pixel Offset からは U_{azi} が検出される。式(9)は各手法の方向 (U_E , U_N , U_Z) に対する感度を表しているとも言える。Azimuth 方向の Pixel Offset は鉛直方向に全く感度を持たない。

よりイメージしやすいように具体的な値を式(9)に入れてみる。ALOS/PALSAR の Ascending 軌道の場合 ($H = -8^\circ$, $I = 39^\circ$) を考えると、

$$\begin{pmatrix} U_{ran} \\ U_{azi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.62 & 0.11 & -0.78 \\ -0.17 & 0.98 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_E \\ U_N \\ U_Z \end{pmatrix} \quad (10)$$

となる。上式から、Range 方向の変動は東西に、Azimuth 方向の変動は南北に感度が高いことがわかる。

1.3 ALOS/PALSAR

ALOS(だいち)は、宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA)により 2006 年 1 月 24 日に打ち上げられた陸域観測技術衛星である。その観測データは、地域観測や災害状況把握、資源探査など、様々な場面で活躍している。

ALOS には PRISM(パナクロマチック立体視センサー), AVNIR-2(高性能可視近赤外放射計 2 型), PALSAR(フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダー)の 3 つの観測機器が搭載されている。本研究ではこの内の PALSAR を利用している。フェーズドアレイ方式とは、従来のレーダーのようにアンテナの向きを変化させるのではなく、平面上の多数の小さなアンテナからそれぞれ放射するマイクロ波の位相を変化することにより照射方向を変えることができる方式である。ALOS/PALSAR の主な性能は、表 1 に示してある。ここで、2 つの Mode(FBS/FBD)は、受信する偏波の違いによるものである。FBD のバンド幅は FBS の半分となっており、Range 方向の分解能も半分に低下する。

今後は ALOS/PALSAR の後続機として SAR 専用の ALOS-2 の打ち上げも決まっております(2013 年を予定)、その活躍がますます期待される。



図 11 ALOS のイメージ

JAXA の HP(<http://www.jaxa.jp>)より。

軌道高度	約 690 km	
回帰日数	46 日	
軌道傾斜角	約 98°	
波長	23.6 cm(L バンド)	
入射角	8~60°	
オフナディア角	34.3°	
Mode	FBS	FBD
バンド幅	28 MHz	14 MHz
偏波	HH VV	HH+HV VV+VH
地上分解能	7~44 m	14~88 m

表 1 ALOS/PALSAR の主な性能

1.4 本研究の目的

ここまで述べてきたように、SAR を利用すれば、現地での観測が難しい場所でも地表変動を面的に、かつ高い空間分解能でとらえることができる。本研究では、SAR のこれらの利点を生かし、大きく分けて 2 つのテーマについて解析を行う。

一つ目として、キルギスで 2008 年 10 月 5 日に発生した地震(Mw 6.7)について解析を行う。地震の前と後の 2 つの時期に撮像された 2 枚の SAR データを用いて解析を行い、地震に伴う地殻変動を検出する。さらに、得られた結果をもとに断層モデルの推定を行う。

二つ目として、パタゴニアの Perito Moreno 氷河について解析を行う。Perito Moreno 氷河は、非常に速い流動速度を示す氷河だが、その流動メカニズムの詳細はよくわかっていない。今回は、異なる 2 種類の軌道の解析結果を用いることにより、氷河の三次元変位を推定する。地形情報を用いずに三次元変位を求めることで、氷河の流動の実態に近い流動メカニズムの解明をめざす。

2 キルギス地震に伴う地殻変動の検出と断層モデルの推定

2.1 観測地域

キルギスは中央アジアに位置し、国土全体の40%が標高3000mを超える山国である。付近ではインドプレートとユーラシアプレートがぶつかり合っており、Mw 5以上の地震が多発している。また、標高が高いため氷河が数多く存在する地域でもある。今回の地震の震源付近も氷河が見られる地域である(図12)。

表2には地震のCMT(Centroid Moment Tensor)解を示してある。CMT解とは、有限の断層を一つの点からの力源によるとして、遠地実体波の解析から推定される解である。断層面に加えて場所や深さ、モーメントマグニチュード(Mw)も推定される。



図12 観測地域

Date	2008/10/05	Mw	6.7
Latitude	39.50 N	Fault plane	(1) Dip=38° Strike=246° (2) Dip=53° Strike=82°
Longitude	73.64 E		
Depth	12.0 km		

表2 地震のCMT解(<http://www.globalcmt.org>)

Dip (傾斜角): 断層面と水平面のなす角

Strike (走向): 断層面と水平面の交線が北の方向となす角

2.2 使用したデータ

2.2.1 ALOS/PALSAR のデータ

本研究では、地震が起こった 2008 年 10 月 5 日を挟むような 3 つのデータのペアを使用し、解析を行った(表 3). 軌道はいずれも Ascending(昇交軌道)で、観測 Path は 527, Frame は 780 である (図 2.1 右の四角で囲まれた地域).

Pair	Master data (YYYYMMDD)	Slave data (YYYYMMDD)	Mode	Span (days)	B _{perp} (m)
①	20081002	20081117	FBD_FBS	46	491.9
②	20080702	20090217	FBD_FBS	230	-498.5
③	20071231	20100105	FBS_FBS	736	560.7

表 3 解析に使用したデータ

表 3 の B_{perp} は基線長の Range 方向に垂直な成分を表しており、この値が一定値以上に大きくなると、コヒーレンスが低くなり干渉縞が得られなくなる. しかし、今回解析を行うペアはいずれも B_{perp} の大きさが 1000 m 以下であり、これは干渉画像を作るのに十分な小さい値である.

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

SAR データを処理する際に、地形の影響を除去するために用いるのが数値標高モデル (DEM) である. 本研究では SRTM4 の DEM を使用した. SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) とは、NASA のスペースシャトルに搭載したレーダーで地球の数値標高モデルを作成することを目的としたミッションのことであり、このモデルを改良したものが SRTM4 である. 空間分解能は 90m メッシュで、データはインターネット上からダウンロードできる (<http://srtm.csi.cgiar.org/>).

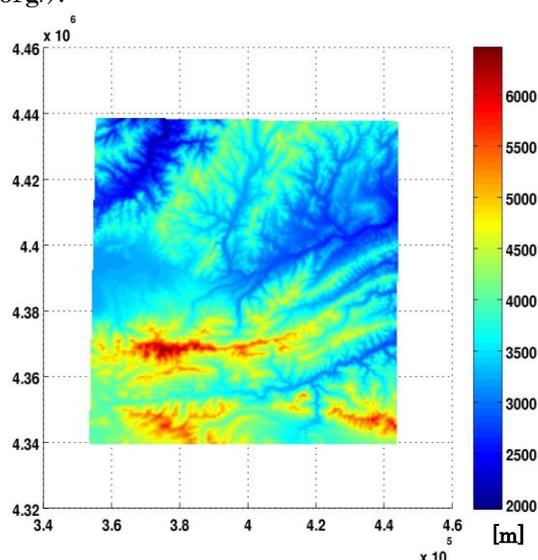


図 13 観測地域の数値標高モデル(座標は UTM 座標)

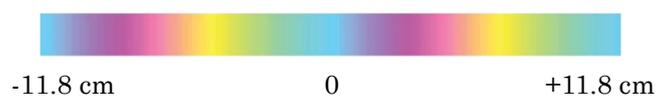
2.3 解析方法

本研究では、①～③の 3 組のペアについて差分干渉解析を行った。また、①のペアについては Pixel Offset 解析も行った。

2.4 結果

2.4.1 差分干渉法の結果

各ペアの差分干渉解析を図 14～16 に示した。いずれの結果についてもカラースケールは同じである。



符号については、プラスが衛星視線方向に遠ざかる変動、マイナスが衛星視線方向に近づく変動を表している。

各ペアの結果の東西・南北・鉛直方向への感度は

$$0.62 \times U_E + 0.11 \times U_N - 0.78 \times U_Z$$

で表される。

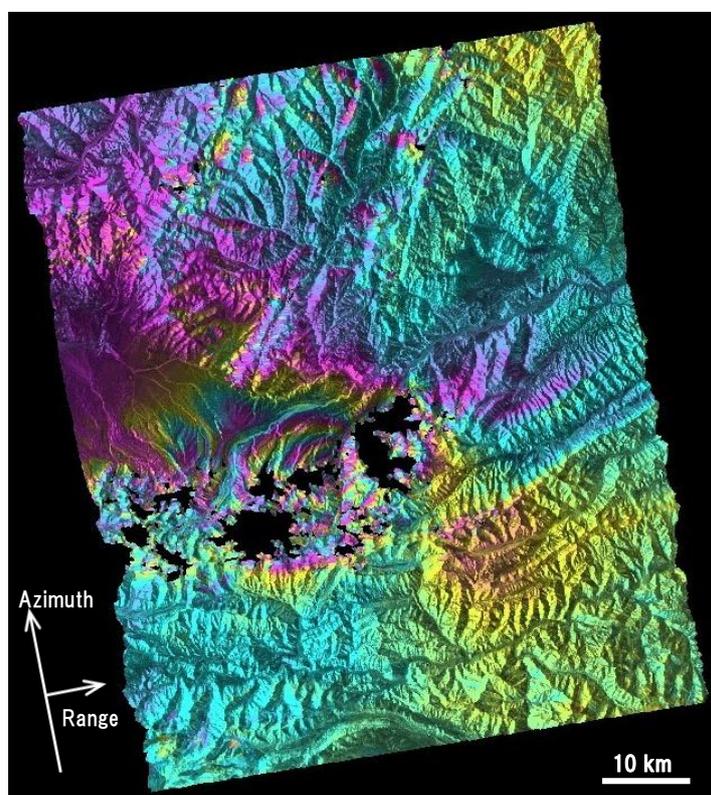


図 14 ①の干渉画像
2008/10/02_2008/11/17
 $B_{\text{perp}}=491.9 \text{ m}$
最大変位は北側で+39cm
南側で-34cm

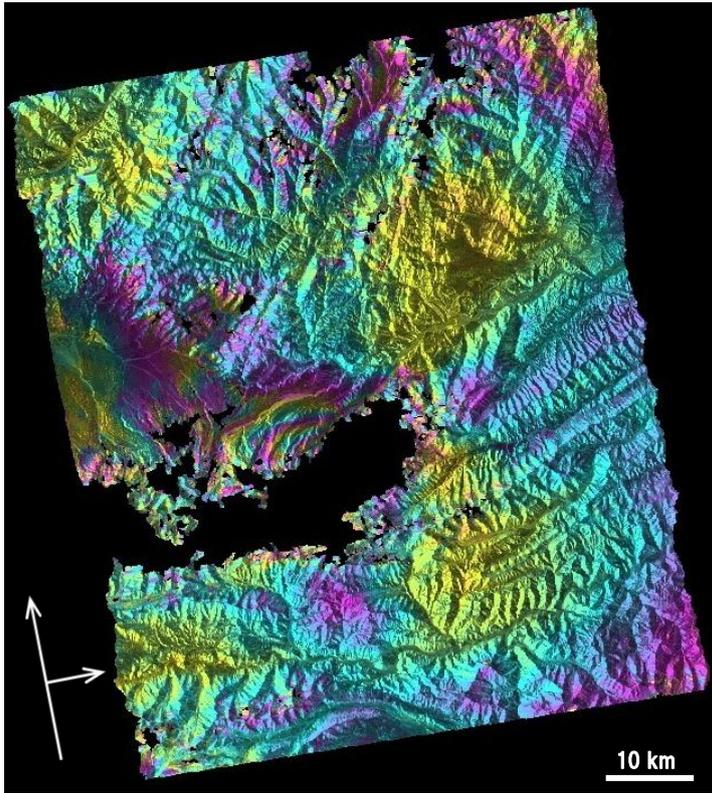


図 15 ②の干渉画像
 2008/07/02_2009/02/17
 $B_{\text{perp}} = -498.5 \text{ m}$
 最大変位は北側で+39cm
 (南側は画像の欠損が多いため不明)

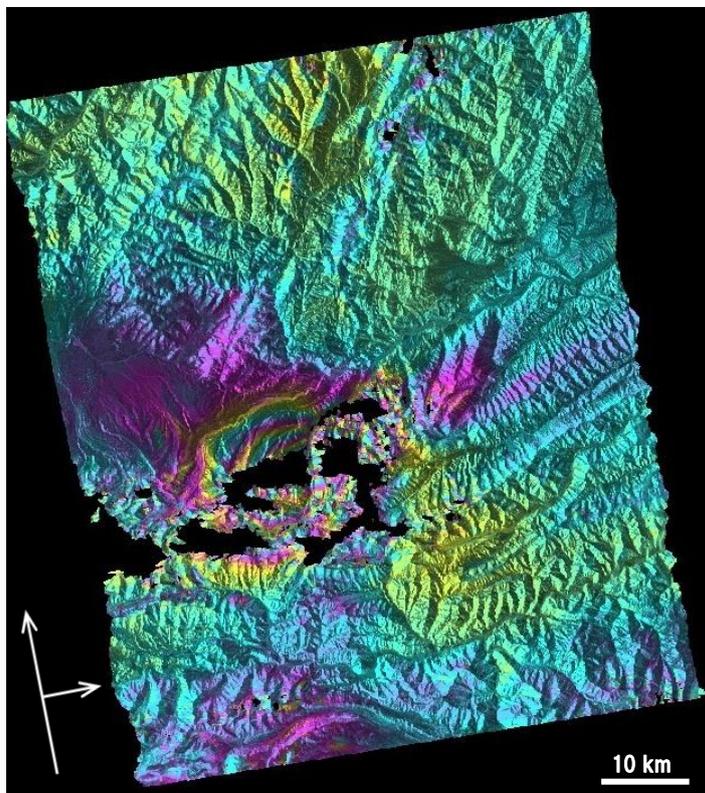


図 16 ③の干渉画像
 2007/12/31_2010/01/05
 $B_{\text{perp}} = 560.7 \text{ m}$
 最大変位は北側で+36cm
 (南側は画像の欠損が多いため不明)

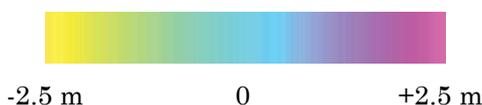
各ペアの干渉画像(図 14~16)を見ると、3 枚とも画像の中央付近に「目玉」のような縞模様があることに気づく。これは地震に伴う変動が現れたものである。②・③の結果については画像の欠損が多いため①の画像(図 14)のみに着目すると、最大変位は「目玉」の北側で+39 cm、南側で-34 cm となっていた。つまり、北側では衛星視線方向から遠ざかる変動、南側では衛星視線方向に近づく変動が検出された。

また、3 枚を見比べると、「目玉」のほかに画像右下の黄色い部分が共通して現れていることがわかる。今、①~③はそれぞれ独立な(画像ペアの観測時期が全て異なる)干渉画像であるので、3 枚全てに現れている変動は地震によるものとみなすことができる。よって、右下の黄色い部分では、地震により衛星視線方向に近づくような変動が起こったと考えられる。

各干渉画像中の欠損は、変動が大きすぎて位相アンラッピングができなかった部分である。ちょうど「目玉」の中央付近にあたるこの地域では、地震により大きな変動が起こったと考えられる。この変動をとらえるために、①について Pixel Offset 解析を行った。その結果は次の 2.4.2 項に示す。

2.4.2 Pixel Offset 法の結果

差分干渉法では検出できなかった大きな変動をとらえるために、①について Pixel Offset 解析を行った。図 18 は Range 方向、図 19 は Azimuth 方向の Pixel Offset 解析の結果を示している。2 枚ともカラースケールは 5 m で 1 サイクルするようになっている。



符号については、図の左端に示した矢印の方向がそれぞれ正を表している。

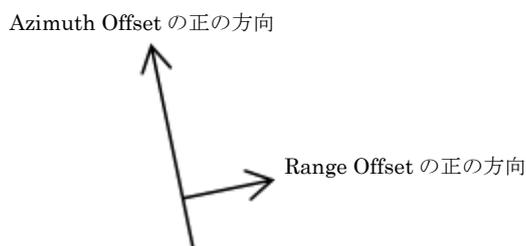


図 17 Pixel Offset 画像の見かた

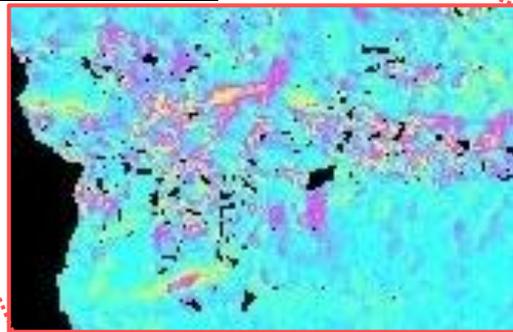
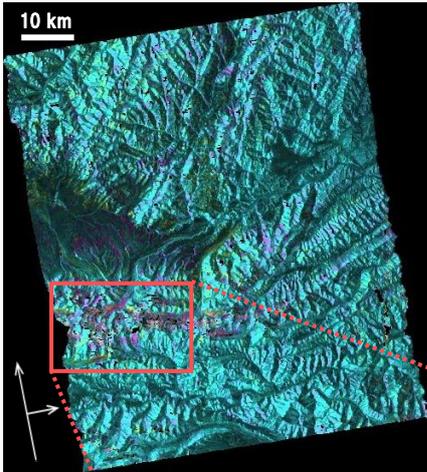


図 18 Range Offset の結果

$0.62 \times U_E + 0.11 \times U_N - 0.78 \times U_Z$
 地震による変動は検出されなかったが、図の変動検出地域は氷河地域
 に対応している。

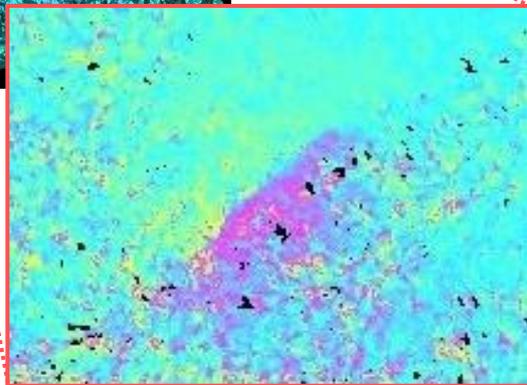
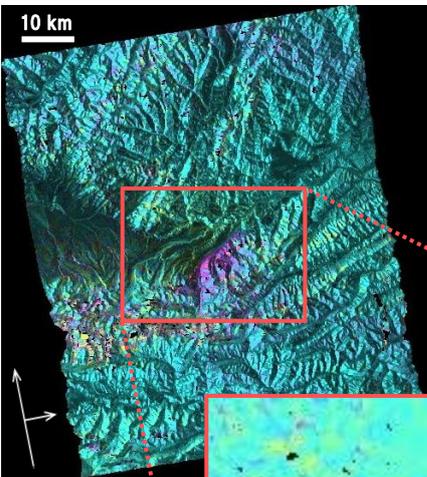


図 19 Azimuth Offset の結果

$-0.18 \times U_E + 0.98 \times U_N$
 最大変位は北側で-1.5m
 南側で+2m

まず、明らかな変動が検出された **Azimuth Offset** の結果(図 19)について、図中の四角で囲まれた部分に着目すると、北側に負の、南側に正の変動が現れていた。この部分は、先ほどの干渉画像(図 14)のちょうど「目玉」の中央付近にあたる。色の分かれ目は断層の上端で、北側で南方向、南側で北方向への変位がみられたことから、この断層は逆断層であろう。

一方、**Range Offset** の結果(図 18)において、先ほど逆断層があると予想した場所を見ても特に変動は見られず、**Range Offset** から目立った変動は検出することができなかった。しかし、図 18 の四角で囲まれた部分に着目すると、氷河の流動と思われる変動がとらえられていた。この地域を地図上で示したのが図 20 であり、これを見ると確かに氷河が存在していることがわかる。

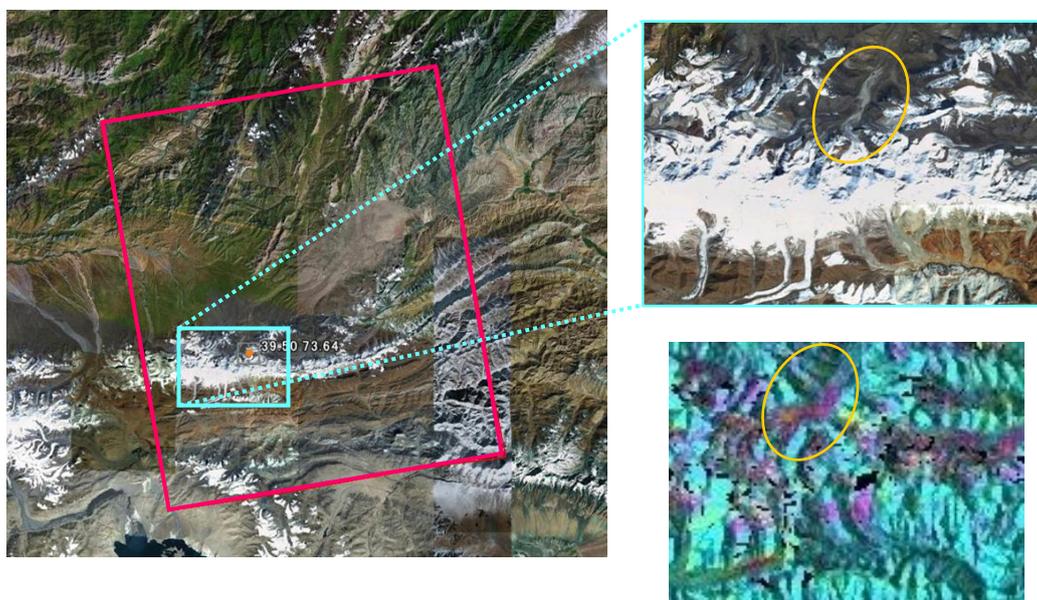


図 20 **Range Offset** がとらえた氷河の流動

2.4 考察

2.4.1 断層モデルの推定

①の差分干渉解析と、**Azimuth** 方向の **Pixel Offset** 解析の 2 つの結果をもとに、半無限弾性体を仮定したモデルを用いてインバージョン解析を行った。結果は図 21 に示した。図中の黒い線で囲まれている部分が、今回推定した断層の位置を表している。

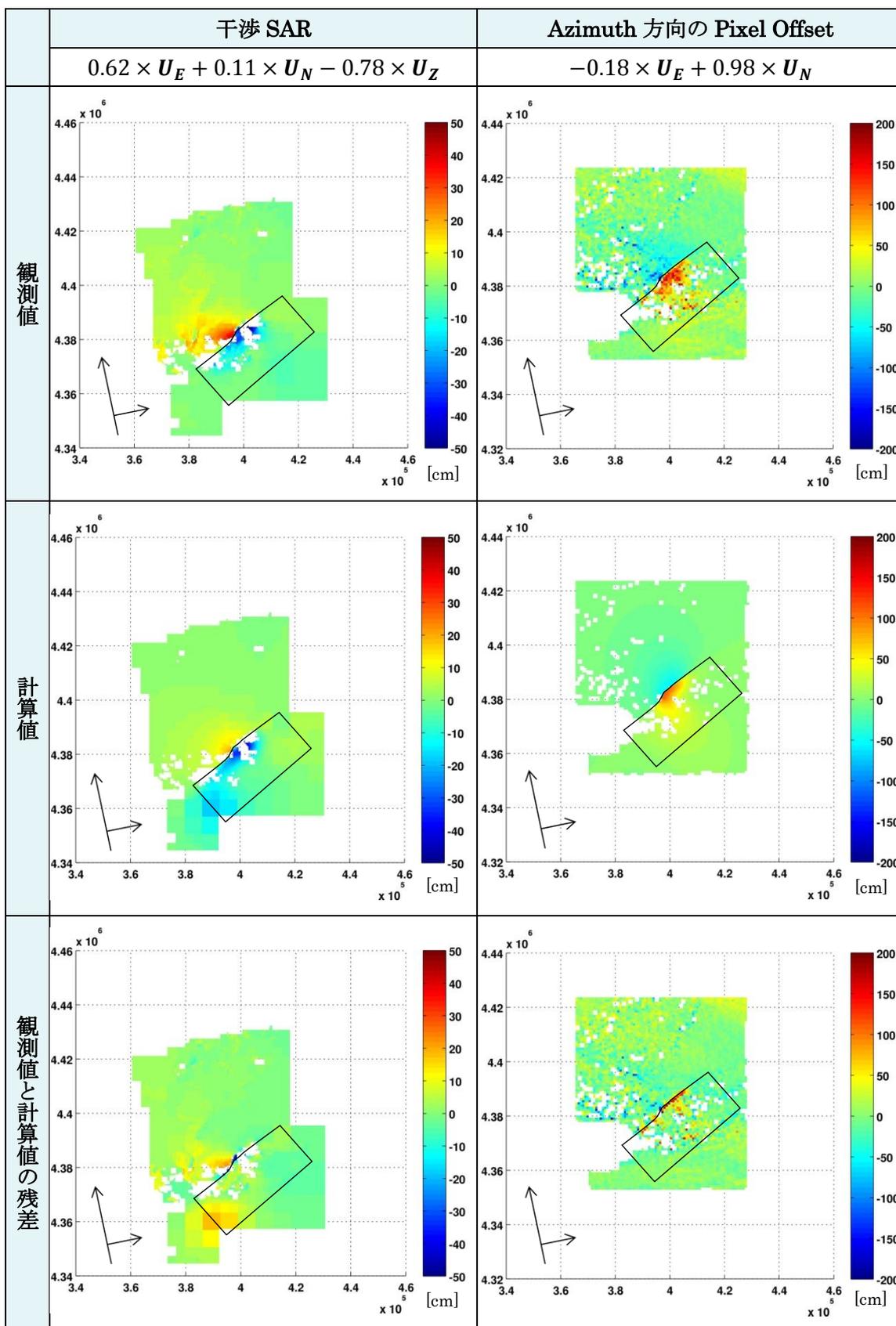


図 21 観測値と計算値と 2 つの残差

断層の推定の手順として、図 21 からわかる通り、どちらの結果も計算値が観測値よりも小さくなっており、残差が大きい。特に、干渉 SAR の北側の変動を説明できていない。また、干渉 SAR の計算値の左下には、観測値にはみられない負の変動が現れてしまっている。よって、今回推定したモデルはまだ改善する必要があると言える。

2.4.2 断層の滑り分布

本研究では短形要素ではなく三角形要素の断層モデルを用いている。これは短形要素と違い、曲がった面でも自由に表現できるのが利点である。また、滑り分布を求める際には、逆方向の滑りが現れないように非負の最小二乗法を利用している。推定した断層の滑り分布は図 22, 23 のようになった。図 22 が左横ずれ成分、図 23 が縦ずれ成分を表している。

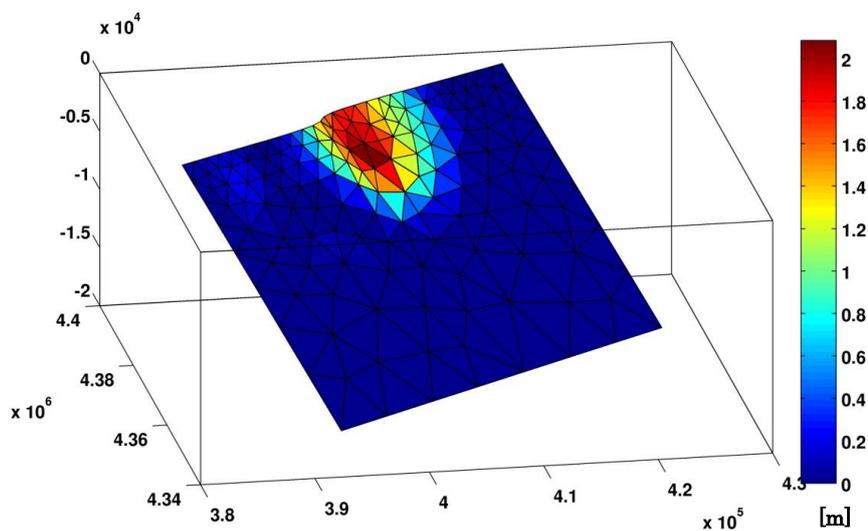


図 22 断層の滑り分布 (左横ずれ成分)

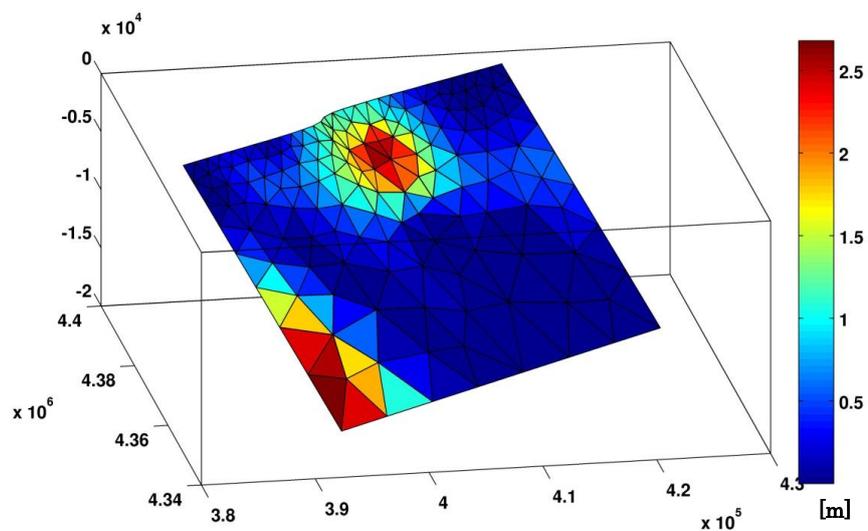


図 23 断層の滑り分布 (縦ずれ成分)

図 23 の深い部分に大きな滑りが現れているが、これは非負の最小二乗法を利用したことによるノイズであると思われる。すべり量を見ると、横ずれ成分よりも縦ずれ成分の方が少し大きく、このモデルは逆断層である。

この結果より地震の各パラメータを算出したところ、表 4 のようになった。ここで、緯度・経度は断層モデルの上端中央のものとして、深さはすべりが最も大きくなっている部分の深さとして計算している。この結果を表 2 (p.11) の CMT 解と比べると、震央は南東方向に 19km ほどずれており、断層面の走向も大きくずれていた。一方、Mw はほぼ一致していた。

Latitude	39.60 N
Longitude	73.82 E
Depth	4 km
Mw	6.7
Fault plane	Dip=48° Strike=41°

表 4 断層モデルから算出した各パラメータ

2.5 まとめ

ALOS/PALSAR の観測データを用いて差分干渉法と Pixel Offset 法を併用することにより、2008 年 10 月 5 日にキルギスで発生した地震に伴う地殻変動を検出することができた。

3 組の地震を挟むペアについて差分干渉解析を行った結果、いずれのペアについても地震による地殻変動を検出することができた。特に、観測期間が短い 2008 年 10 月 2 日と 2008 年 11 月 17 日のペアの干渉画像にはもっとも変動がきれいに現れていた。このペアの干渉画像からは北側で衛星から遠ざかる方へ最大 39cm、南側で衛星に近づく方へ最大 34cm の逆断層と思われる変位が検出された。さらに、これと同じペアについて Pixel Offset 解析を行ったところ、Azimuth 方向の結果において差分干渉法ではとらえられなかった大きな変動が現れていた。北側で最大 1.5m、南側で最大 2m の逆断層と思われる変位を検出することができた。

これらの解析結果から東落ちの断層モデルを推定し、インバージョン解析を行った。その結果、残差には干渉 SAR で 10 cm 以上のシグナルが残っており、今回のモデルでは観測結果を完全に説明できたとはいえない。

一方、断層モデルのすべり分布は、多少ノイズがみられるとはいえ縦ずれ成分が横ずれ成分よりも少し大きい逆断層となっており、解析結果からの予測と一致していた。

2.6 今後の課題

今回のインバージョン解析の結果では、観測値と計算値の残差が大きく、特に干渉 SAR の観測値をあまりよく説明できていない。今後は、地震による変動をより忠実に再現できるような断層モデルづくりを行っていきたい。

3 Perito Moreno 氷河(パタゴニア)の三次元変位の推定

3.1 観測地域

パタゴニア氷原は、チリとアルゼンチンの国境に沿って南北約 540 km にわたって広がる巨大な氷河群である。その規模は、南極を除けば南半球で最大となっている。非常に数多くの氷河が存在するが、その中でも有名な氷河の一つとして Perito Moreno 氷河(図 24)がある。Perito Moreno 氷河は南パタゴニア氷原から溢流する氷河で、その末端はアルヘンチノ湖へと流れ込んでいる。このように末端が海や湖に流れ込む氷河はカービング氷河と呼ばれ、流動速度が非常に速いことで知られている。Perito Moreno 氷河もその例外ではなく、年間 500m 以上という非常に速い速度で流動している。しかし、その流動メカニズムの詳細はよくわかっていないのが現状である。

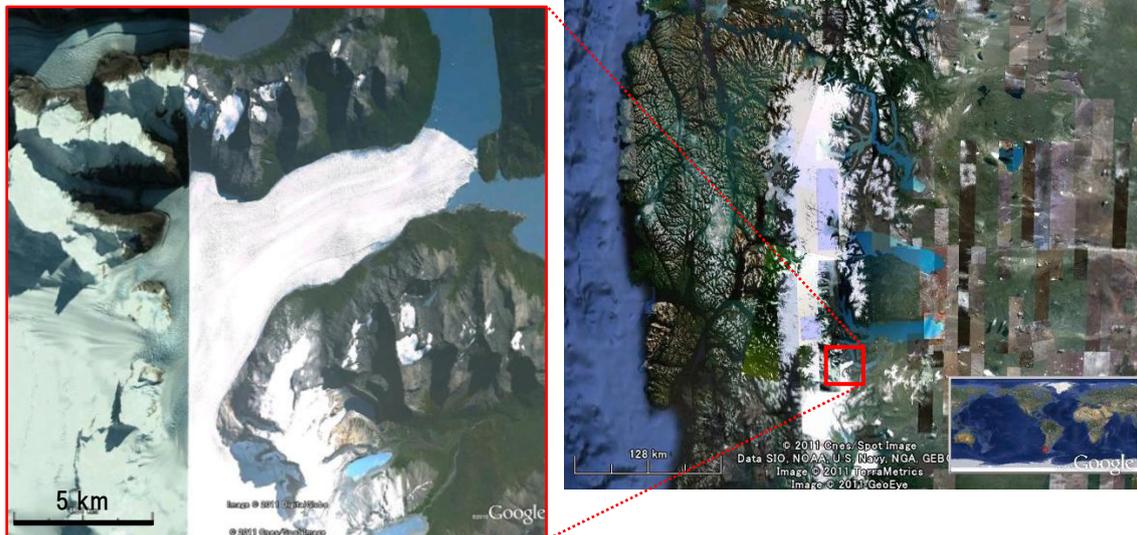


図 24 Perito Moreno 氷河

3.2 SAR の観測データを用いた先行研究

Perito Moreno 氷河について、SAR の観測データを用いた先行研究はこれまでにいくつか報告されている。ここではそれらの研究の一部を挙げ、本研究との違いを述べる。

まず、主に差分干渉解析によって氷河の流動を検出した論文の一つに、Stuefer ほか(2007)がある。この研究では SIR-C/X-SAR という SAR が利用された。SIR-C/X-SAR は、Lバンド(波長 24.3 cm)、Cバンド(波長 5.7 cm)、Xバンド(波長 3.1 cm)での観測が可能だが、この研究では Lバンドでの観測データ(空間分解能は Range 方向で 3.8 m、Azimuth 方向で 8.2 m)のみが使用された。観測データは 1994 年 10 月の 7 日、9 日、10 日の 3 つで、このうち 10 月 9 日と 10 日のデータを使用して差分干渉解析が行われた。さらに、氷河の末端部の崩壊が激しい部分においては、Range・Azimuth の 2 成分について Pixel Offset 解析が行われた。この解析には 10 月 7 日と 10 日のデータが使用された。これらの解析結果より、氷河の流動速度の推定が行われた。差分干渉解析を行った部分については、得られた衛星視線方向の変位に加えて、SAR 画像、Landsat 衛星画像、航空写真からの情報も考慮することにより、流動の方向が推定された。図 25 は Stuefer ほか(2007)における流動速度の推定結果である。さらに、この結果を現場観測の結果と比較したところ、Pixel Offset 法の精度が低いために生じた誤差はあったものの、十分に一致していた。

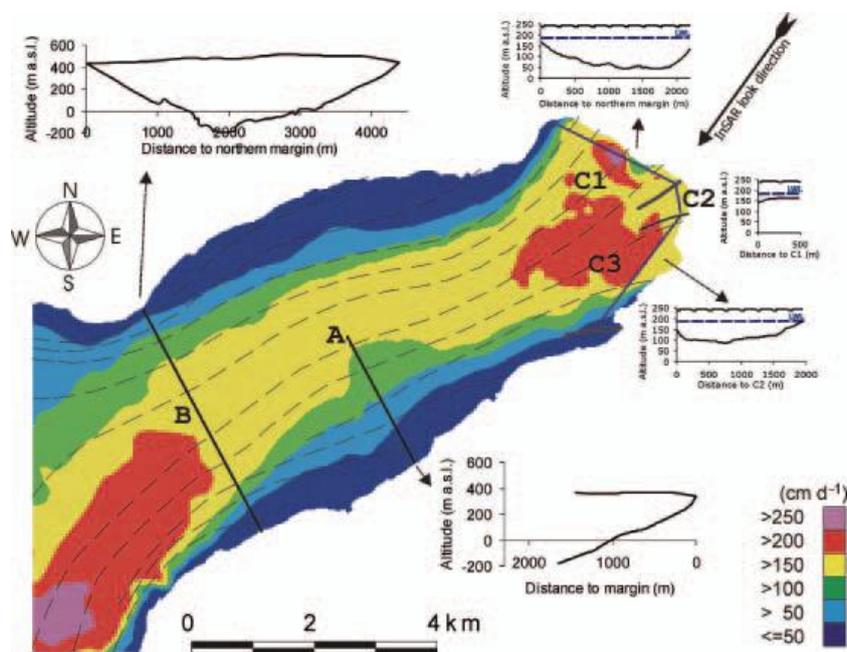


図 25 Stuefer ほか(2007) Fig.3

また、差分干渉法ではなく **Pixel Offset** 法を用いて氷河の流動速度を推定した研究もいくつか報告されている。そのうちの一つに、Floricioiu ほか(2008)がある。この研究では **TerraSAR-X** という衛星が利用された。**TerraSAR-X** の波長は X バンド(9.65 GHz)で、回帰日数は 11 日である。解析には、2007 年 12 月 29 日、2008 年 1 月 9 日、2008 年 1 月 20 日、2008 年 1 月 31 日の観測データが用いられた。それらを **Pixel Offset** 解析して得られた **Range・Azimuth** 2 方向の変動量と地形情報を用いて、地表面における氷河の流動速度が推定された。その空間分布は、先に述べた Stuefer ほか(2007)などの差分干渉解析を用いた研究の結果とほぼ一致していた。この結果の図については、3.6.1 項の考察において示している(p30 図 31)。

ここで紹介した研究は一部にすぎないが、**Perito Moreno** 氷河の流動に関する SAR 衛星観測を利用した先行研究には、大きく分けて差分干渉法を利用するものと **Pixel Offset** 法を利用するものの 2 種類がある。しかし、いずれの研究においても流動方向の決定には SAR データ以外の補足的な情報が用いられた。これらの研究で求められた結果は、氷河が各研究で使用した SAR 画像、航空写真、数値標高モデルなどに沿って流動しているという仮定のもとでのみ成り立つものである。これに対し本研究では、**ALOS/PALSAR** の **Ascending・Descending** 2 種類の軌道の観測データを用いることによって、地形情報を用いることなく氷河の三次元変位を推定した。地形情報に頼らずに推定された三次元変位は、氷河の流動メカニズムの解明にも役立つことが期待される。

3.3 使用したデータ

本研究では、1組の Ascending(A1)と2組の Descending(D1, D2)の3つのペアの観測データを使用した(表 5). 図 26 の赤い枠で囲まれた地域が Ascending の観測範囲, 青い枠で囲まれた地域が Descending の観測範囲である. 観測期間はいずれも最短の 46 日間となっている.

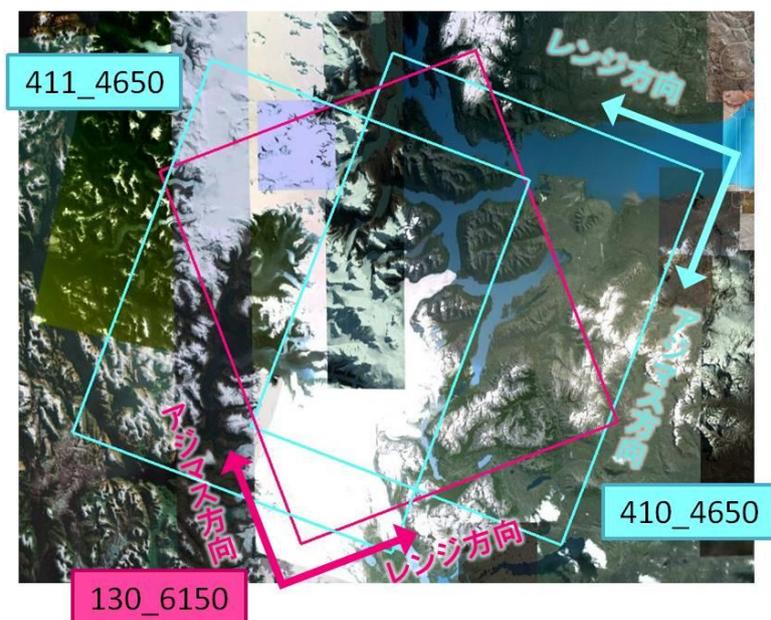


図 26 観測地域

Pair	Path_Frame	A/D	Master data	Slave data	Mode	Span (days)	B _{perp} (m)
(A1)	130_6150	A	20100605	20100721	FBD_FBD	46	-129.3
(D1)	410_4650	D	20071104	20071220	FBD_FBS	46	-72.84
(D2)	411_4650	D	20071121	20080106	FBD_FBS	46	295.1

表 5 解析に使用したデータ

A は Ascending, D は Descending を表す.

3.4 解析方法

先に述べたように, Perito Moreno 氷河はとても流動が速い氷河(500 m/year 以上)であるため, 差分干渉法では流動を検出できない. そこで, 今回の解析には Pixel Offset 法を利用した. その結果は 3.5.1 項に示した. さらに, その解析結果と 1.2.4 項の式(9)から氷河の三次元変位を推定した. こちらの結果は, 3.5.2 項に示した.

3.5 結果

3.5.1 Pixel Offset 解析の結果

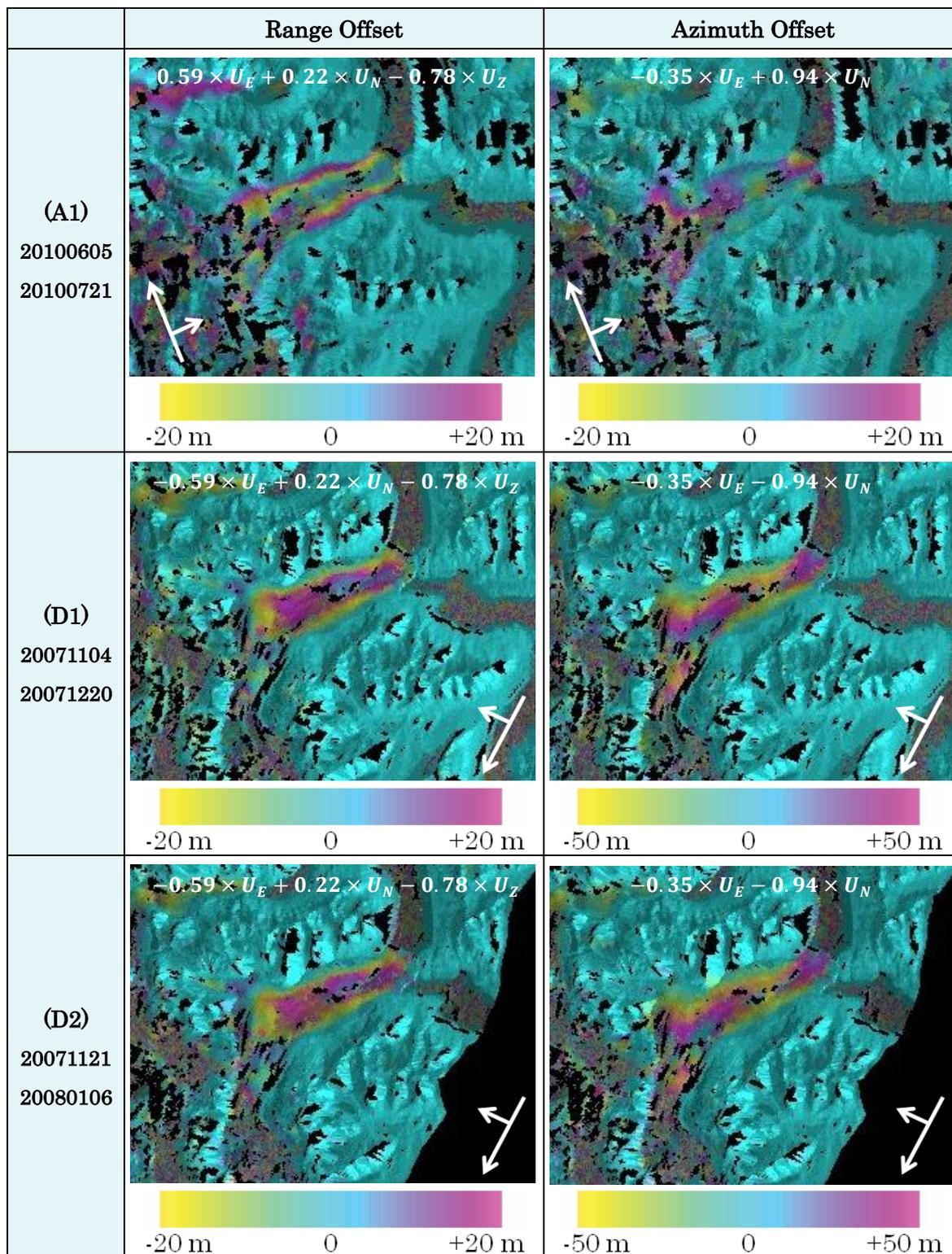


図 27 Perito Moreno 氷河の Pixel Offset 解析結果

図 28 には各ペアの Pixel Offset 解析の結果を示した。どの結果についても、周囲は青色 (変動量 0) であるのに対して、Perito Moreno 氷河の部分にははっきりと変動が現れている。Perito Moreno 氷河のような流れが速い氷河でも、Pixel Offset 法を利用することにより流動を検出することができた。

Ascending(A1)では Range Offset が氷河上流で最大+80 m なので、衛星視線方向の距離が伸長する方向に変動している。また、Azimuth Offset が氷河末端で最大+25 m なので、衛星進行方向と同じ向きに変動している。一方、Descending(D1)では、Range Offset が氷河中央で最大-36 m なので、衛星視線方向の距離が短縮する方向に変動している。また、Azimuth Offset が氷河上流で最大-100 m なので、衛星進行方向と逆の向きに変動している。Descending(D2)では、Range Offset が氷河中央で最大-32 m、Azimuth Offset が氷河上流で最大-100 m となり、(D1)と近い結果が得られた。

3.5.2 三次元変位の推定

Ascending, Descending それぞれの軌道について、Range, Azimuth の 2 方向の Pixel Offset 結果が得られた。これらの結果と式(9)の関係を利用すれば、三次元変位を求めることが可能である。各軌道の H (Heading 角), I (入射角) は表 6 に示してある。Ascending の Range, Azimuth 方向の Pixel Offset 解析の結果をそれぞれ A_{ran} , A_{azi} とする。同様に、Descending の解析結果についても D_{ran} , D_{azi} とする。これらの値を式(9)に代入すると、式(11)が得られる。

	H	I
Ascending	-20.6°	39°
Descending	-159°	39°

表 6 Ascending, Descending 各軌道の Heading 角と入射角

$$\begin{pmatrix} A_{ran} \\ A_{azi} \\ D_{ran} \\ D_{azi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.59 & 0.22 & -0.78 \\ -0.35 & 0.94 & 0 \\ -0.59 & 0.22 & -0.78 \\ -0.35 & -0.94 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_E \\ U_N \\ U_Z \end{pmatrix} \quad (11)$$

上式から明らかなように、既知の量が 4 つ、未知の量が 3 つであるので、氷河の三次元変位 (U_E , U_N , U_Z) を求めることができる。

よって、あとは式の中に入れる値 (A_{ran} , A_{azi} , D_{ran} , D_{azi}) を考えればよいことになる。今回使用した 3 組のデータ(表 5)はいずれも観測期間が 46 日であるので、各観測値も 46 日分の変動を含んでいることになる。しかし、同じ 46 日間とはいえ、今回使用したデータでは Ascending(A1)の観測時期と Descending(D1, D2)の観測時期は、年どころか季節も一致していない。そのため、今回は氷河の流動速度が常に一定であるという仮定のもとで、三次元変位の推定を行った。その結果が図 29 である。図 29 に示した結果は、式(11)から得られた結果を 46 で割って 1 日あたりの変位にしたもので、単位は[m/day]である。

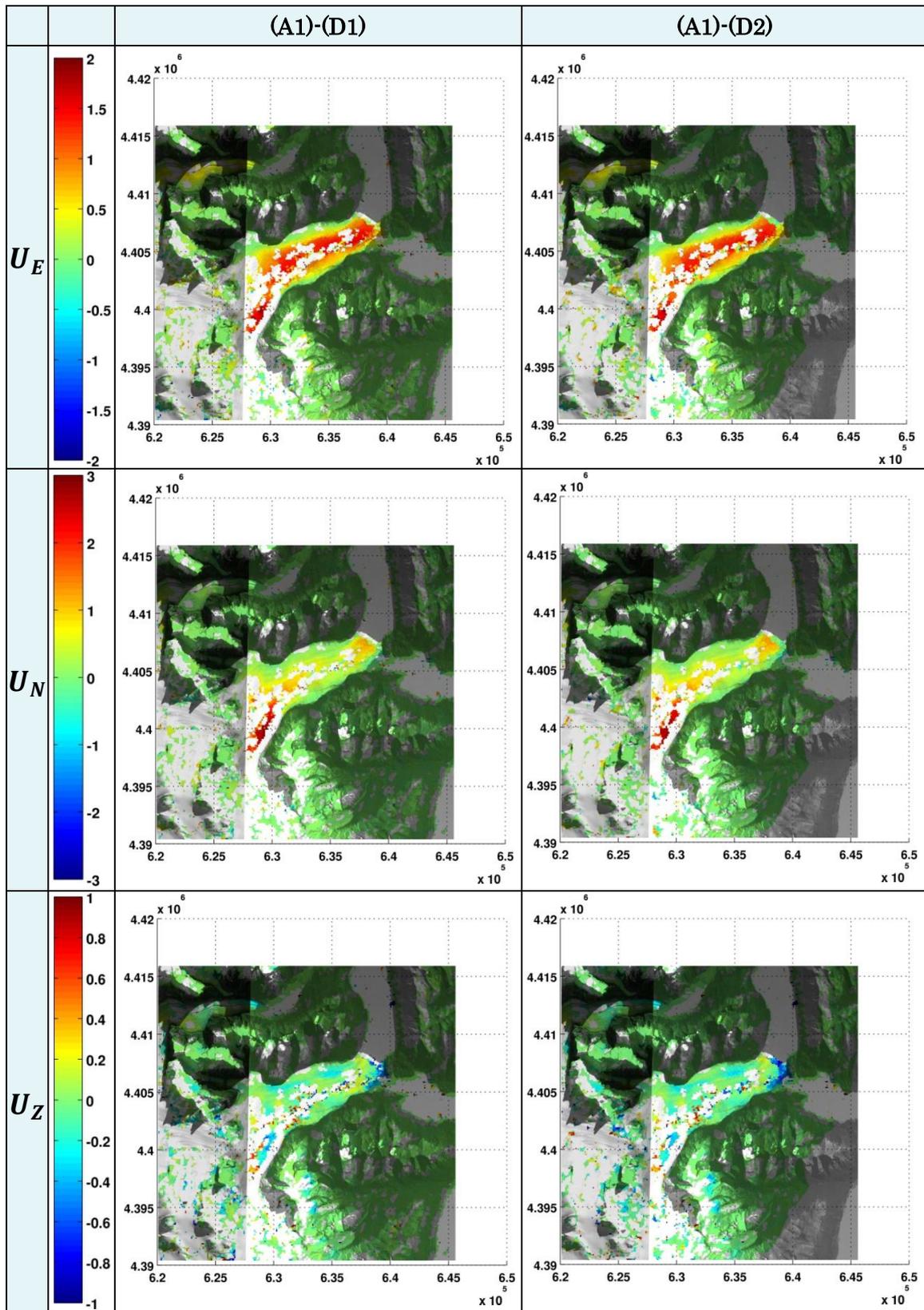


図 28 Perito Moreno 氷河の三次元変位 (単位は[m/day])

図 10 より、(A1)-(D1), (A1)-(D2)のどちらの組み合わせも、各成分の推定結果はほぼ同じとなった。 U_E , U_N には流れの中央部分において正の変位が、逆に U_Z では山側においてわずかだが負の変位が検出された。また、氷河の上流部分では 3 成分ともに他の部分と比べて大きな変位が検出された。さらに、氷河の末端部分では U_N , U_Z が大きな変位を示していた。各成分の最大値は、 U_E が上流部分で+約 2 m, U_N が上流部分で+約 3 m, U_Z が末端部分で-約 1 m となった。

3.6 考察

3.6.1 流動速度の空間分布

(A1)-(D1), (A1)-(D2)の 2 つの組み合わせで求めた三次元変位はほぼ同じ結果となったので、これ以降は(A1)-(D1)から推定された三次元変位についてのみ考えることとする。図 30 は、(A1)-(D1)から求めたベクトル (U_E , U_N , U_Z) の大きさを色で表している。矢印は二次元ベクトル (U_E , U_N) の向きを表している。一部で矢印の向きが明らかにおかしい箇所があるが、これは使用した Pixel Offset 解析結果に含まれていたエラーによるものと思われる。分布を見ると、流動速度は氷河の流れの中央部分に近いほど大きくなっている。また、氷河の上流部分は約 3 m/day という非常に大きな速度で流動している。

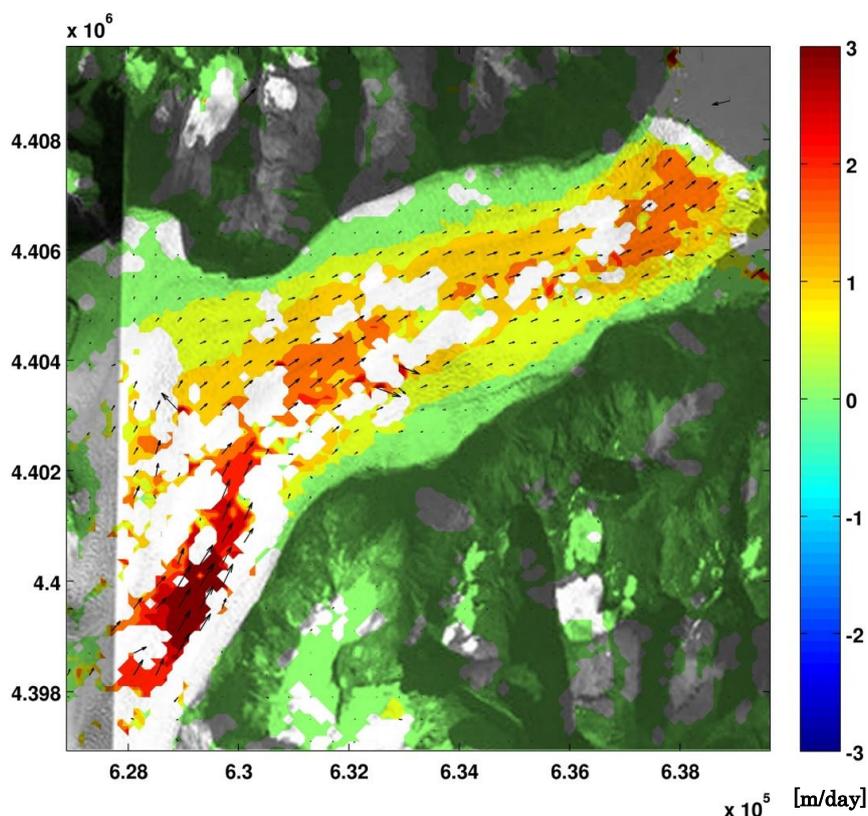


図 29 Perito Moreno 氷河の流動速度分布とその方向

ここで、Perito Moreno 氷河の地域の SRTM4 の DEM を見てみると、標高は図 30 のようになっている。この図からわかるように、氷河の上流は下流に比べて勾配が急である。図 29 において上流での流動速度が大きいのは、この急勾配が原因であると考えられる。

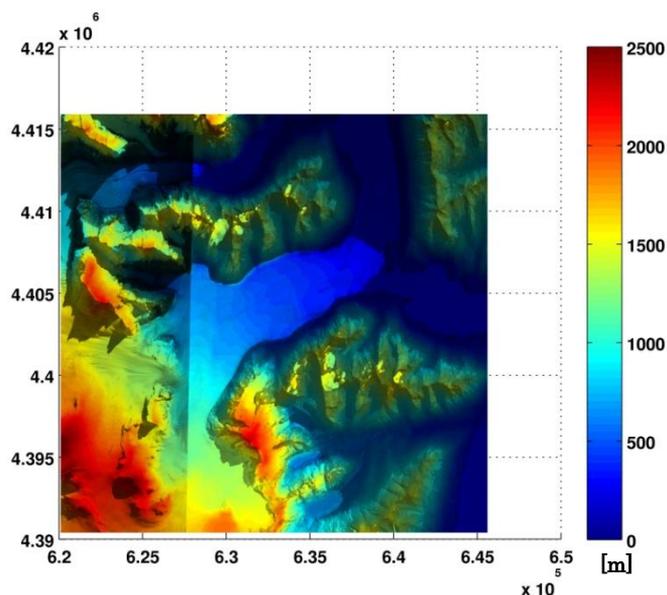


図 30 Perito Moreno 氷河の標高

次に、先行研究ではどのような速度分布になっているかを見る。図 31 は Pixel Offset 解析と地形情報を利用した Floricioiu ほか(2008)の結果である(詳しくは 3.2 節参照)。本研究の結果(図 29)と比べると、速度の大きさの分布はほぼ一致している。

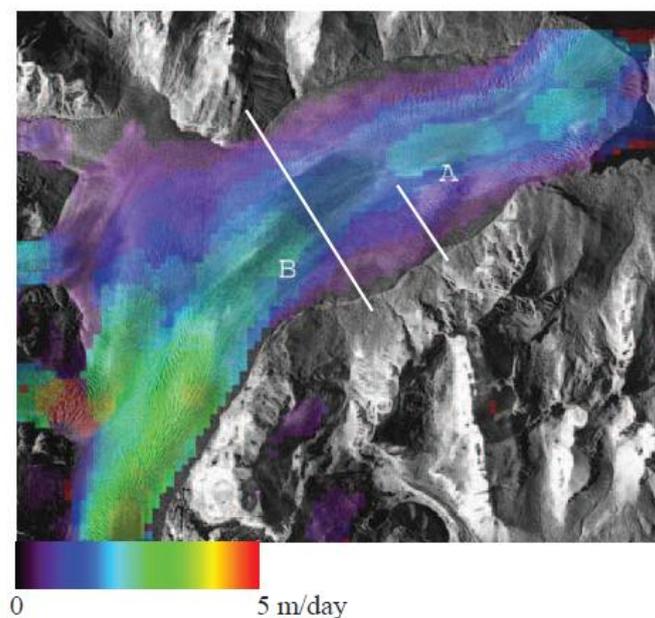


図 31 Floricioiu ほか(2008) Fig.3

3.6.2 地形から推定した三次元変位

今回の解析では2組のデータから地形情報を一切用いずに三次元変位の推定を行ったが、1組のデータと地形情報から変位を推定することも可能である。そこで、(A1)の Range Offsetの結果と、解析に使用したSRTM4のDEM(図30)の地形情報からも変位を推定した。その結果が図32である。また、図33には比較のため(A1)-(D1)から推定した流動速度の大きさを示した。

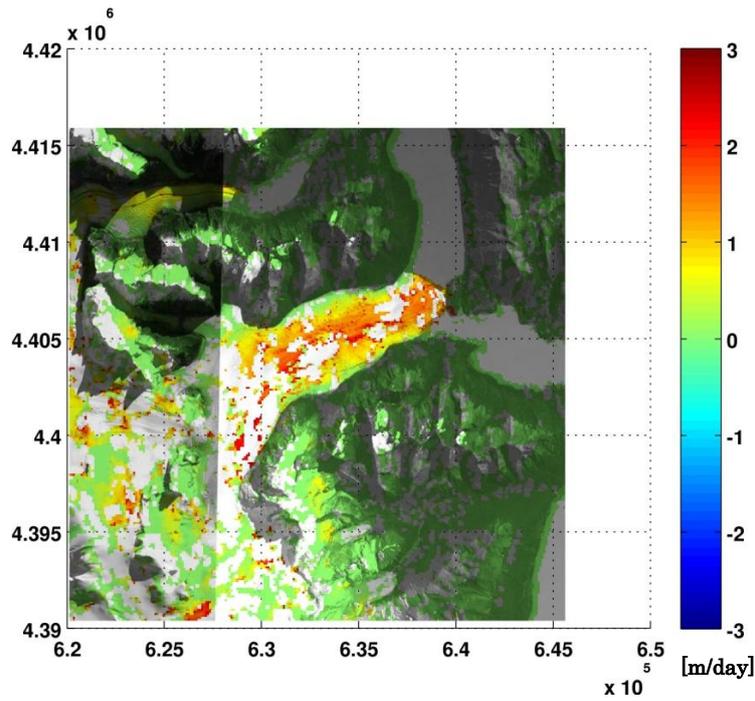


図32 (A1)の Range Offset と SRTM4 の DEM から推定した流動速度の大きさ

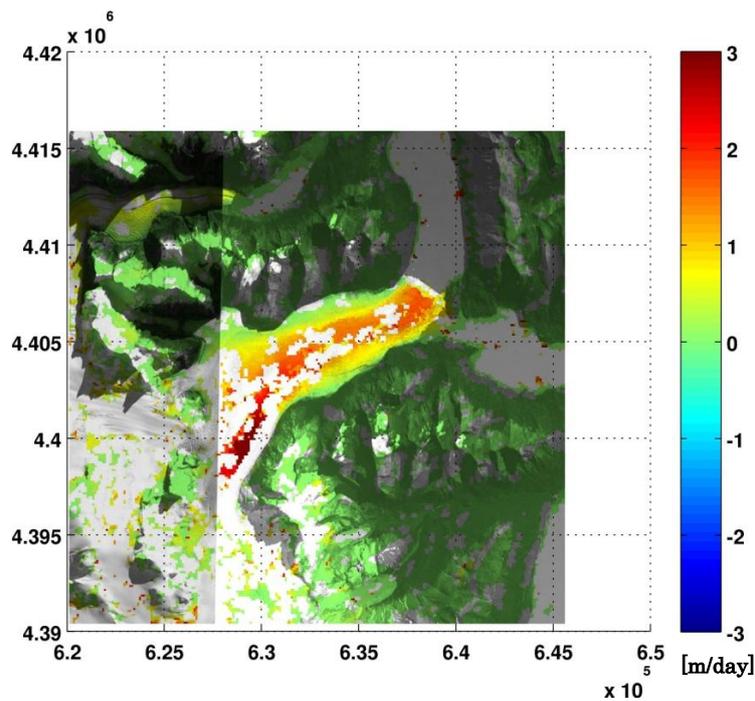


図33 (A1)と(D1)から推定した流動速度の大きさ

この2つの結果の残差をとったものが図34である。

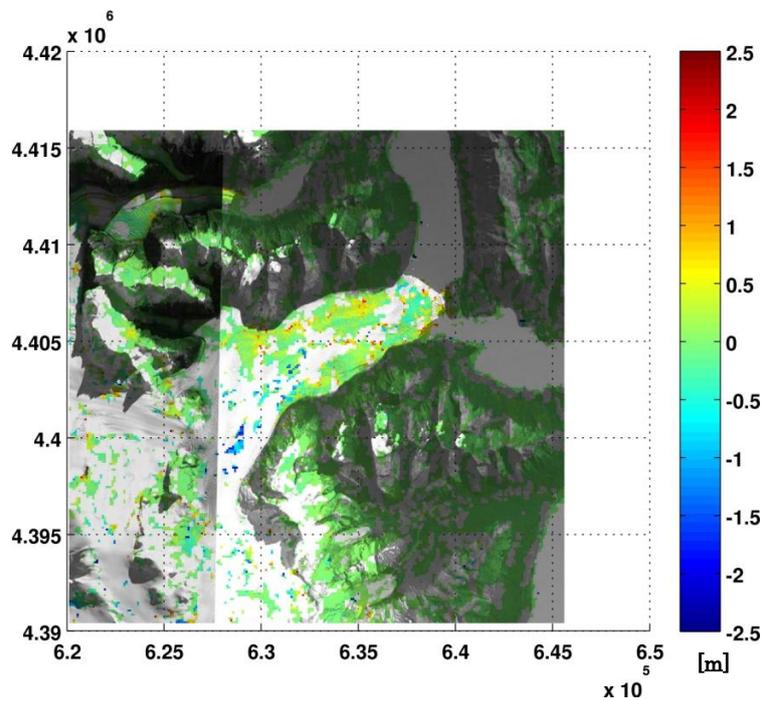


図34 図32と図33の残差

ここで、点在している大きな残差は用いたDEMに含まれるエラーによるものと思われる。それを除くと氷河の上流部で残差が大きくなっており、最大で約2mもの差が見られる。一方、氷河の中流、末端では残差はそれほど大きくない。この結果より、Perito Moreno氷河は完全にDEMの地形に沿って流れているとは言えないことがわかる。

3.7 まとめ

パタゴニアの Perito Moreno 氷河について, ALOS/PALSAR の観測データを用いて Pixel Offset 解析を行ったところ, 氷河の流動を検出することができた. さらに, 氷河の流動速度を常に一定であると仮定した上で, Ascending・Descending 両方についての Pixel Offset 解析結果を用いることにより, 地形情報に頼らず氷河の三次元変位を推定した. その結果, \mathbf{U}_E は氷河の流れの中央で, \mathbf{U}_N は氷河の上流で, \mathbf{U}_Z は氷河の末端で大きな変位が見られた. 三次元の速度ベクトルの大きさを見たところ, 氷河の流れの中央に近いほど大きくなっており, 特に氷河上流では約 3 m/day という大きな値となっていた. その空間分布は先行研究とよく一致していた.

Ascending のデータのみと地形勾配から流動速度を推定し比較したところ, 大まかには一致しているものの上流部分では大きな残差が見られた.

3.8 今後の課題

本研究では, 三次元変位の推定に使用できるデータが観測時期の異なる 3 組しかなかったため, 流動速度は常に一定とした上で三次元変位を推定している. しかし, 実際の流動速度は一定ではなく季節的に変化している. 今後は他のデータについても解析を行い, 流動速度の空間的な分布だけでなく, 時間的な変化を推定したい.

また, 今回の方法で求めた三次元変位と地形から求めた三次元変位のより詳細な比較をすることにより, Perito Moreno 氷河の流動メカニズムの理解を進めたい.

4 謝辞

PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にある。本研究で用いたキルギスについての PALSAR データは、PIXEL において共有しているものであり、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。パタゴニアについての PALSAR データは、ALOS PI によって提供されたものである。

本研究を進めるにあたりご指導いただいた古屋先生に心より感謝申し上げます。研究の進め方についての指導や教科書の輪読、発表物の添削など、いつも丁寧に教えていただきました。本当にありがとうございました。これからも何かとお世話になることが多いと思いますが、どうぞよろしく願いいたします。また、同研究室の日置先生や固体系ゼミの先生方には発表で多くのアドバイスをいただき、研究に対するさらなるやる気へとつながりました。ありがとうございました。そして、同研究室の先輩方、同じ4年生の阿部くん、本間くん、小川くんにもお礼を申し上げたいと思います。わからないことがあった時に助けていただいただけでなく、時々他愛のない話をしたことも楽しかったです。皆さんのおかげで楽しく充実した1年を過ごすことができました。ありがとうございました。

5 参考文献

- 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.
- Rott, H., M. Suefer, A. Siegel, P. Skvarca and A. Eckstaller.(1998): Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield. Geophysical Research Letters, 25(9), 1407-1410.
- Michel, R. and E. Rignot. (1999): Flow of Glacier Moreno, Argentina, from repeat-pass Shuttle Imaging Radar images: comparison of the phase correlation method with radar interferometry, Journal of Glaciology, 149(45), 93-100.
- Stuefer, M., H. Rott and P. Skvarca. (2007): Glaciar Perito Moreno, Patagonia: Climate sensitivities and glacier characteristics preceding the 2003/04 and 2005/06 damming events, Journal of Glaciology, 53(180), 3-16.
- Floricioiu, D., M. Eineder, H. Rott and T. Nagler. (2008): Velocities of major outlet glaciers of the Patagonia Icefield observed by TerraSAR-X. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2008 in Boston U.S., IV, 347-350.
- Ciappa A., L. Pietranera and F. Battazza. (2010): Perito Moreno Glacier (Argentina) flow estimation by COSMO SkyMed sequence of high-resolution SAR-X imagery, Remote Sensing of Environment, 114(9), 2088-2096.
- Tobita, M., M. Murakami, H. Nakagawa, H. Yarai, S. Fujiwara, and P. A. Rosen (2001): 3 - D surface deformation of the 2000 Usu Eruption measured by matching of SAR images, Geophys. Res. Lett., 28(22), 4291-4294.
- JAXA(<http://www.jaxa.jp/>)
- Google earth(<http://earth.google.com>)
- 日本測地学会測地学テキスト WEB 版(<http://www.geod.jpn.org/web-text/index.html>)