

InSAR による泥火山の活動及び 永久凍土融解に伴う地表変形の検出

北海道大学理学部地球惑星科学科 4 年
宇宙測地学研究室

02120880

飯尾 研人

指導教官：古屋 正人 教授

概要

20世紀半ば以降、宇宙測地技術は大きな発展を遂げてきた。衛星からマイクロ波を用いて地表の情報を得る SAR もその内の一つである。SAR を用いて地殻変動を検出する方法として InSAR という技術がある。InSAR は地上に観測点を必要とせずに地表変形（地殻変動と呼ぶこともある）を検出することができ、Lバンド SAR は植生を透過するため森林に覆われた地表でも有効である。2014年には JAXA が ALOS の後継機である ALOS-2 を打ち上げ、宇宙測地分野からの期待は高まっている。

本研究では、地表の変形を伴いながら、地球温暖化に大きな影響を与えうるメタンガスを放出するという二つの事象に注目し、InSAR での検出を試みた。

一つ目はメタンガスと共に泥や水などを噴出し、山体に堆積したり、円形にひろがったりする泥火山である。泥火山が多く存在するアゼルバイジャンにおいて、SAR の広い観測幅を活かし、一度に多くの泥火山を検出することができた。そのほとんどが数 cm 程度のものであった。その中でも比較的大きい変動を検出した泥火山に対して、茂木モデル(1958)により圧力源の推定を行った。推定された圧力源は、深さ 400m、体積変化量は $1.0 \times 10^5 \text{m}^3$ となった。

二つ目は永久凍土地帯によく見られる地形であるサーモカルストである。サーモカルストとは、永久凍土の融解に伴う地盤沈下により出来た凹地に湖沼や湿地を形成した地形である。永久凍土に関する科学的知見はまだ不足している。サーモカルストの形成過程そのものの衛星からの観測は困難であったが、InSAR を用いれば広大な永久凍土地帯において広域な地盤沈下の観測が可能になる。予備的な結果であるが、局所的に 10cm 程度の衛星視線方向から遠ざかる変動が検出された。永久凍土は空間的に不均一であるから、このように局所的な変動を検出することは、地上レベルでの観測にも活かされると考えられる。

目次

1	はじめに	1
1.1	宇宙測地技術と地殻変動	1
1.2	SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー)	2
1.3	InSAR (Interferometric SAR : 干渉 SAR)	5
1.4	SAR 衛星	8
1.4.1	ALOS/PALSAR	8
1.4.2	ALOS-2/PALSAR-2	9
1.5	本研究の目的	10
2	泥火山の活動に伴う地殻変動	11
2.1	泥火山	11
2.2	観測地域	12
2.3	使用データ	13
2.4	解析結果	14
2.5	圧力源の推定	26
2.6	考察	28
3	永久凍土融解に伴う地殻変動	29
3.1	北極圏とサーモカルスト	29
3.2	観測地域	30
3.3	使用データ	31
3.4	解析結果	31
3.5	考察	37
4	まとめ	37
5	謝辞	38
6	参考文献	39

1 はじめに

1.1 現代の宇宙測地技術と地殻変動

従来の測地技術は、人間が地上で直接観測する三角測量や基線長測量が一般的であったが、現代の宇宙測地技術には、VLBI (Very Long Baseline Interferometry : 超長基線電波干渉法) や SLR (Satellite Laser Ranging : 衛星レーザ測距), GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム) といったものがある。特に GPS は、現在は地殻変動の観測研究手法として主流である。カーナビゲーションや携帯電話の高精度な位置情報として利用されており、私たちの日常生活に最も身近な技術であり、無くてはならない技術となっている。このような宇宙測地技術はここ 50 年間ほどで急速に発達したものであり、今では地球上の多くの地域の位置座標が、そこに観測機器を設置できれば観測できる。しかし、地上に観測点を設置しなければならないことは問題点でもあり、観測点を設置できないような環境では、観測をすることができない。

本研究で用いる SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー) も近年、急速に発達してきた技術の一つである。SAR は、地上に観測点の設置すること無く、面的に地表画像データを取得することが可能な技術である。といっても可視光を用いる航空写真や衛星写真とは異なり、SAR は画像レーダーである。つまり、衛星に搭載しているレーダーからマイクロ波を地上に照射し、その反射波を受信する能動型センサーである。その大きな特徴は、マイクロ波を使用していることにより、昼夜関係なく、また、雨や雲を貫通するので全天候で観測可能という点である。したがって SAR は、一年の半分が夜となる極地や、常に雲に覆われている熱帯地域を含めた全球的な地球表層観測として、海洋や森林、雪氷、災害など様々な分野で利用されている。一般に SAR 画像といえば、マイクロ波の地表からの反射強度を示す画像を指す。一方、地殻変動を検出には SAR 画像ではなく、InSAR (Interferometric SAR : 干渉 SAR) という技術が用いられる。SAR から得られるデータには反射波の位相情報も含まれている。同一地域に対して、観測時期の異なる二つの SAR データを干渉させることにより、位相情報に含まれるアンテナから地表までの距離の差をとることができる。これにより、数 cm の感度で地表変位の観測をすることができる。

2014 年 5 月 24 日に JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency : 宇宙航空研究開発機構) によって、日本の SAR 衛星である陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2: The Advanced Land Observing Satellite-2) が打ち上げられた。これまで数々の研究、観測がなされた「だいち」(ALOS) の後継機として、地殻変動はもちろん、資源探査、海洋観測、災害状況把握など多目的での利用が期待されている。国内外ですでに ALOS-2 を用いた研究、観測は行われているが、2015 年 5 月に箱根山の大涌谷の火山活動が活発

になった際には、緊急観測の結果から区域への立ち入り規制及び、安全対策の判断材料として利用されたことや、2015年4月25日に発生したネパールでの大地震では、地震に伴う明瞭な地殻変動を検出したことなどは記憶に新しい。またこれらの干渉画像はメディアにも取り上げられ、ALOS-2の存在とその技術を多くの人を知ることとなったであろう。今後のALOS-2の活躍及び、宇宙測地技術全体の発展には目が離せない。

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

SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー) とは、人工衛星や航空機に搭載されたアンテナから斜め下にある観測対象に対して、マイクロ波を照射し、その反射波の後方散乱の強弱から対象物の表面の状態を二次元画像として得ることができる技術である。人工物や森林、粗面な場所では後方散乱は強くなり、画像では明るく見える。一方、水面や滑走路、ゴルフ場などのような凹凸の無い滑らかな面では反射波のほとんどが前方散乱してしまうために、後方散乱は弱く、画像では暗く見える。

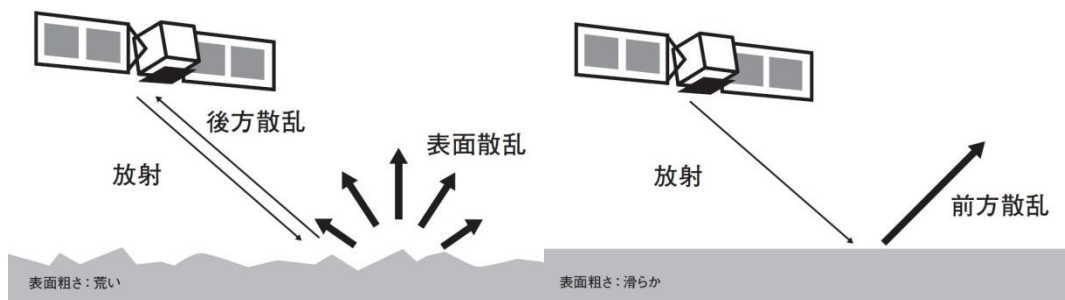


図 1.1 表面の状態による反射波の散乱の違い (画像 © JAXA)

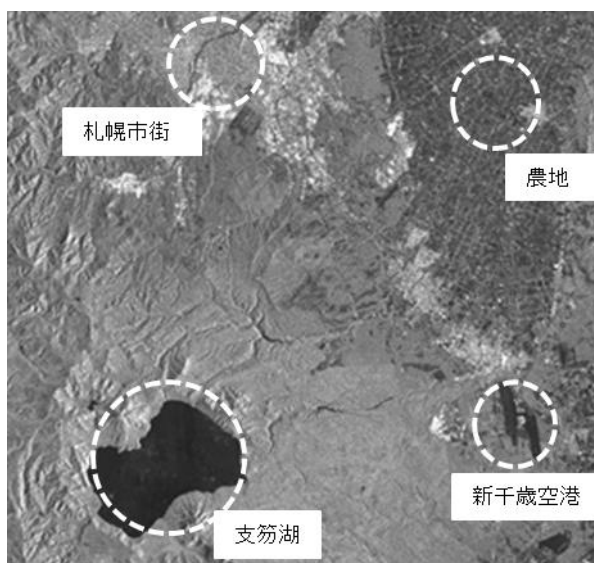


図 1.2 SAR で得られる札幌周辺の強度画像
支笏湖の湖面や新千歳空港の滑走路では、後方散乱が弱いので暗く見えることがわかる。一方、人工物の多い札幌市街地や支笏湖周辺の森林では、後方散乱が強くなり明るく見えている。また、農地のような散乱強度が中間程度の表面では、上の両者の中間程度の明るさで見え、区別することができる。

SAR データは振幅と衛星地表間の距離情報を含む位相を持つが、実際に SAR から得られた生データを見ただけでは、何を示しているのかわからない。生データを適切に処理することにより、まず SLC 画像 (Single Look Complex Image : 複素画像) が得られる。その実部と虚部の二乗和の平方根をとることで上のような反射強度画像が得られる。

マイクロ波で観測し、画像を生成する上で、どの程度細かい対象物を見分けられるかという空間分解能が大きな問題となる。電波照射方向をレンジ (Range) 方向、衛星進行方向をアジマス (Azimuth) 方向といい、それぞれに対して空間分解能を向上させなければならない。

Range 方向の分解能を向上させるためには、パルス圧縮技術が用いられている。圧縮前のパルス幅を T_p とすると、Range 方向の分解能 Δr は、

$$\Delta r = \frac{cT_p}{2} \quad (1)$$

と表せる。ここで c は光速である。すなわち Range 方向の分解能を高めるには、パルスを短くすれば良い。しかし、実際には、パルス幅を短くすると送信出力が小さくなり、ノイズの影響が大きくなってしまう。これを防ぐには送信出力を大きくすれば良いのだが、衛星には電力的に限界がある。ところが、実際に使われているパルス長は $20\sim 40\mu$ 秒程度だが、これでも数メートル程度の分解能を実現している。これはマイクロ波パルスの波形が関係しており、式で書くと以下のようなになる、

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

ここで、 $\text{rect}(t/T_p)$ はパルス長 T_p の矩形関数、 f_c は搬送波周波数 (GHz)、 t は時間変数、 K_r はチャープ率 ($10^{11}\sim 10^{12}$ Hz/s) を示す。これは純粋な正弦波パルスから $\pi K_r t^2$ だけ異なっており、周波数変調されていることが分かる。

位相部分を時間微分すると、

$$f(t) = f_c + K_r t \quad (3)$$

となる。これは瞬間周波数と呼ばれ、周波数が時間の一次関数で表され、線形に変化する。故に、(2) 式のような変調は線形周波数変調といい、このように変調されたパルスをチャープパルスという。(3) 式から、パルス長に相当する時間 T_p では、 $K_r T_p$ だけ周波数だけ変化しており、これをバンド幅 B_w (Hz) という。

$$B_w = K_r T_p \quad (4)$$

地上でセンサーからの距離 R に一点だけ散乱体があるとすると、 t_0 秒後に戻る反射波は、

$$v(t) \propto \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \cos\left\{2\pi\left(f_c(t-t_0) + \frac{K_r(t-t_0)^2}{2}\right)\right\} \quad (5)$$

となる。これが画像となる前の生データ(raw data)である。ところが、この状態では、周波数が高すぎて記録が大変になってしまうので、高周波成分を除去し、低周波成分のみを通し、複素データにするローパスフィルタ(low-pass filter)をかける。すると(2)式は、

$$v^*(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \exp\left\{-i\frac{4\pi R}{\lambda}\right\} \exp\{i\pi K_r(t-t_0)^2\} \quad (6)$$

となる。このような処理を IQ (In-phase Quadrature)-demodulation という。しかし、実際の反射波はノイズが多く、散乱体による本来の反射波のみを抽出しなければならない。そこで、整合フィルタ(Matched filter)にかける。これは、遅延 t_0 を除いた波形の形状は分かっていることを利用し、受信データとの相関をとることで反射波を抽出するというものである。そうして抽出した反射波を v_{out} とすると、

$$v_{out} = T_p \text{sinc}\{K_r T_p(t-t_0)\} \quad (7)$$

こうして得られたパルス幅は $1/K_r T_p$ であるから、Range 方向の分解能 Δr は、

$$\Delta r = \frac{c K_r T_p}{2} = \frac{c}{2B_w} \quad (8)$$

となる。(1)式と比べると $K_r T_p^2$ 倍に圧縮されている。これがパルス圧縮技術の概要であり、このパルス圧縮技術は SAR 以外のセンサーでもよく用いられている。

Azimuth 方向の分解能を向上させるためには、Range 方向と似たような圧縮処理のほかに、合成開口技術が用いられている。アンテナ長(開口長)を L とすると、SAR における Azimuth 方向の分解能 Δa は、

$$\Delta a = \frac{L}{2} \quad (9)$$

と表される。つまり、Azimuth 方向の分解能はアンテナのサイズだけに決定し、高度や波長には依存しない。これは、SAR の特徴であり、有名な結果である、しかし、衛星に搭載するアンテナ長にも限界はある。そこで SAR では、衛星に搭載したセンサーが、移動しながらパルスの反射波を受信することで、あたかも空間上 (Azimuth 方向) に大きなアンテナを合成することで、Azimuth 方向の分解能を高めている。これが合成開口技術であり、合成開口レーダーといわれる語源でもある。

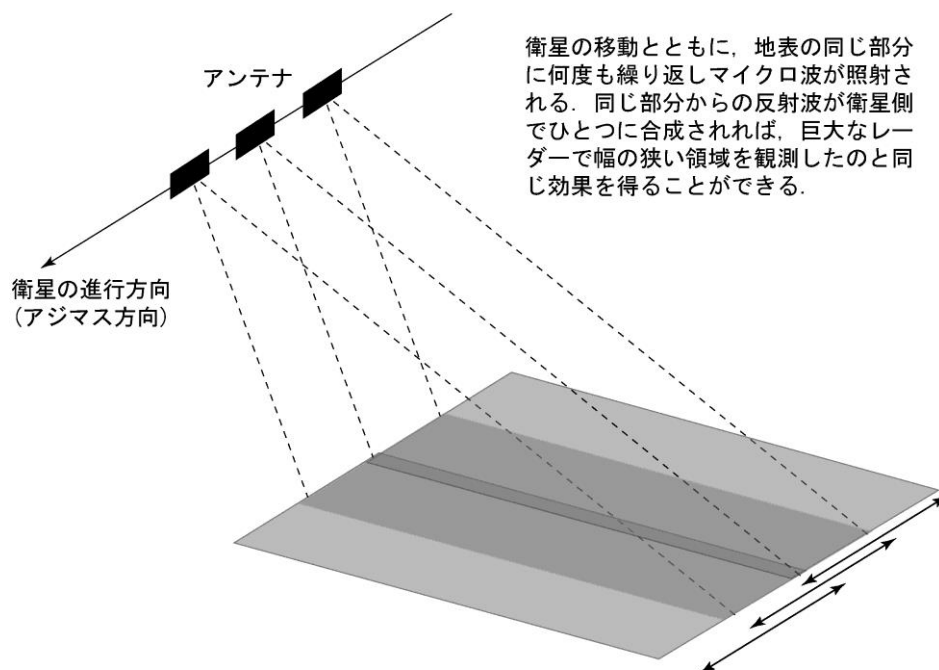


図 1.3 合成開口の原理

(測地学テキスト <http://www.geod.jpn.org/web-text/part2/2-4/index.html> より)

1.3 InSAR (Interferometric SAR : 干涉 SAR)

InSAR (Interferometric SAR : 干涉 SAR) とは、衛星が回帰軌道を持つことを利用し、同一地域に対して、異なる時期に観測をすることで、二つの SAR データに含まれる位相差からその間の地殻変動を検出するという技術である。InSAR の原理は、ヤングの実験による干涉縞の原理そのものである。ヤングの干涉縞は、スリットを通る二つの同一波長の波が、十分離れた壁に到達したときの行路差に応じて、同位相部分で強め合い振幅が大きくなり、逆位相部分で打ち消し合うことにより生じる縞模様である。原理は同じであるが、

InSAR で生じる縞模様は、強度による縞模様ではなく、位相そのものによる縞模様ということになる。衛星は回帰軌道を通り、同一地域を撮動するとはいっても、異なる二つの時期の画像（それぞれ master 画像, slave 画像という）がピクセル単位で一致するほど軌道精度は良くない。したがって、干渉処理を行う前に、二つの画像の各ピクセルを対応させなければならない。この処理は、位置合わせと呼ばれ、干渉の可否に大きく影響する。また他にも干渉の可否に影響することはいくつかある。異なる二つの時期の衛星軌道にはずれが生じている。このずれの距離を基線長（衛星軌道間距離）といい、基線長の視線方向の垂直成分を B_{perp} (Perpendicular Baseline) という。この B_{perp} の値が干渉の可否に大きく影響する。 B_{perp} の値は、小さいほど干渉しやすくなる。また二つの観測期間のインターバルが長すぎると干渉しづらくなる。

二つの SAR データが上手く干渉した場合、最初に初期干渉画像が得られる。この初期干渉画像の干渉縞には、多くの要素の縞が含まれており、位相差 $\Delta\varphi$ は次のように表される。

$$\Delta\varphi = \varphi_{disp} + \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{ion} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (10)$$

ここで、 φ_{disp} は地殻変動による変動縞、 φ_{orb} は衛星軌道間距離による軌道縞、 φ_{topo} は地形による地形縞、 φ_{ion} は電離層による遅延の効果、 φ_{atm} は大気遅延の効果、 φ_{noise} はその他のノイズを示す。軌道縞は、衛星軌道データを用いて軌道縞を推定し、差し引くことで除去できる。地形縞は、衛星軌道データと DEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) から、地形縞の Simulation 画像を作成し、差し引くことで除去できる。大気遅延や電離層によるノイズは、地形相関大気ノイズや長周期のモデリングによりある程度は、除去することができるが完全に除去することはできていない。ノイズの除去は、InSAR による地殻変動を検出する上で重要な課題であり、ノイズ除去の研究が行われている。その他のノイズはほぼ無視できる程度である。これらの処理をすることにより、変動縞のみを取り出すことができる。しかし、この状態では位相から変動量を得ることができない。それは、位相が $[0, 2\pi]$ に丸め込まれている (Wrap されている) からである。そこで、位相アンラッピング (Phase Unwrapping) といわれる処理をすることで不連続な位相をつなぎ合わせ、変動量を得ることができる。また、これまでのデータは全てレーダー座標であるから、これを UTM (Universal Transverse Mercator) 座標へと座標変換すれば、最終的な干渉画像が完成する。ALOS に搭載されている L バンドといわれるレーダー波長は 23.6cm であるから、一周分位の位相変化は、SAR が往復の距離を測定していることを考慮すると、 $23.6/2 = 11.8\text{cm}$ となることが分かる。InSAR では、一周分の位相変化を虹色で表す。こうして得られた変動量は、地表の三次元変位ベクトルを衛星視線方向 (LOS : Line of Sight) に投影したものである。したがって、一枚の干渉画像から三次元変位ベクトルを抽出することはできないが、衛星の軌道方向には、Descending (南行軌道) と Ascending (北行軌道) があり、それぞれでの変動量を検出し、また、Pixel Offset 法や MAI (Multiple Aperture

Interferometry) といった方法を用いることで, Azimuth 方向の変動を検出することができる. こうして三成分の変動が得られるので三次元変位の計算が可能である.

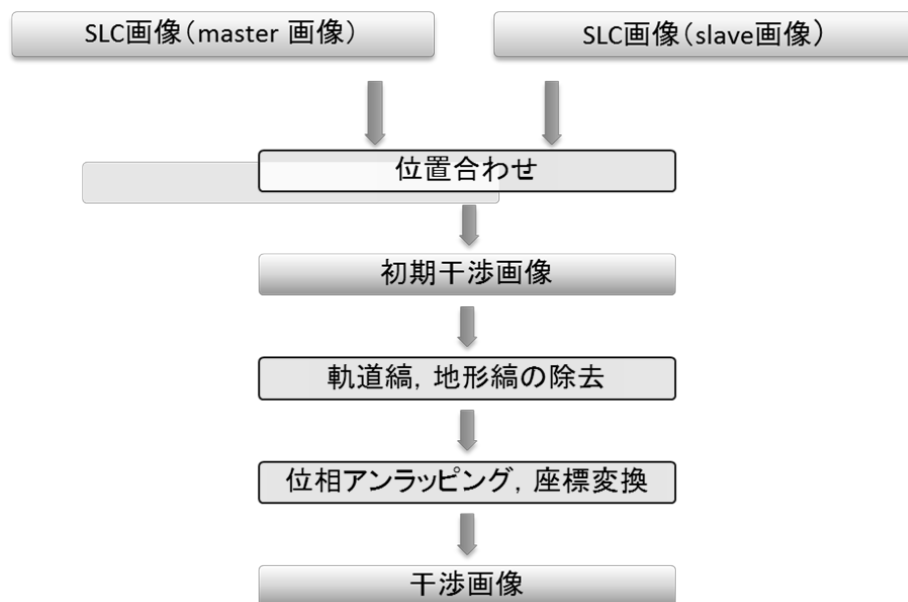


図 1.4 干渉画像作成の流れ

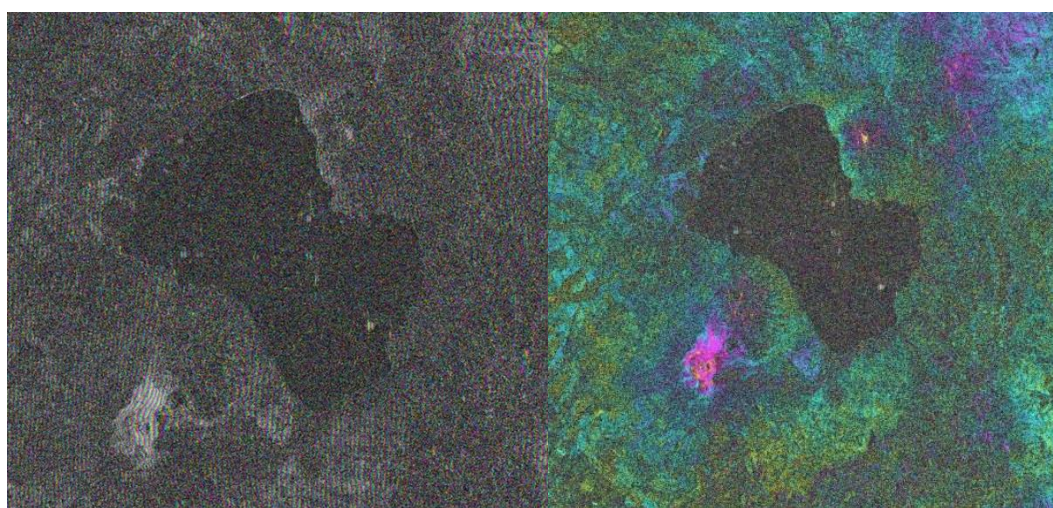


図 1.5 (左) 初期干渉画像の例 (右) 軌道縞, 地形縞を除去した干渉画像

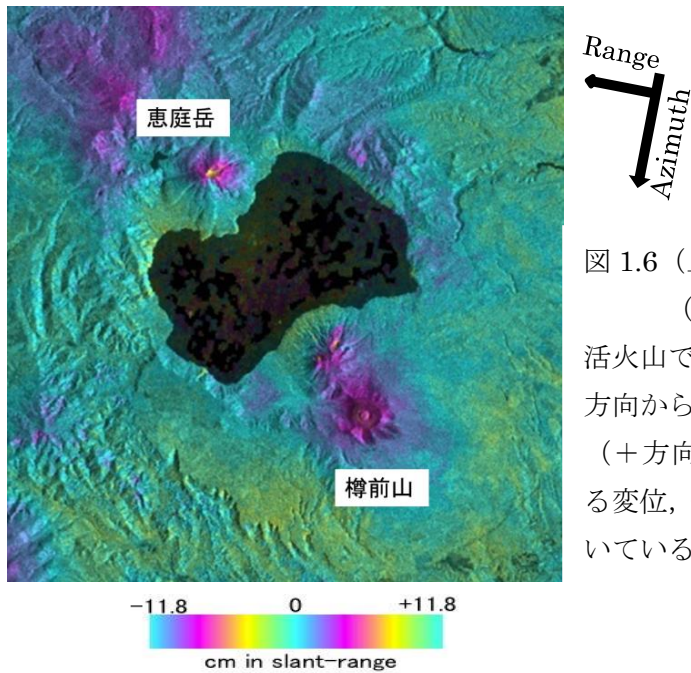


図 1.6 (上) 完成した干渉画像の例

(下) 視線方向の変位量を示すスケールバー
活火山である樽前山及び、恵庭岳において衛星視線方向から遠ざかっていることが分かる。

(+方向への色の変化が衛星視線方向から遠ざかる変位，-方向への色の変化が衛星視線方向に近づいている変位を示す)

1.4 SAR 衛星

1.4.1 ALOS/PALSAR

2014年1月24日、JAXAにより陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)が打ち上げられた。その目的は地域観測、地図作成、災害状況把握、資源探査等である。

ALOSには三種類のセンサーが搭載されており、その中の一つであるPALSAR(フェーズドレイ方式Lバンド合成開口レーダー)がSAR観測に用いられている。フェーズドレイ方式とは、マイクロ波の照射角度(オフナディア角)を自由に変えられる方式である。観測にはLバンド(波長23.6cm)のマイクロ波が用いられている。また、Lバンドは、波長の短いXバンドやCバンドと比べて植生の影響を受けにくいという特徴をもっている。PALSARには、高分解能モード、広観測域モード、多偏波モードといった観測モードがある。広観測域モードはオフナディア角を変えることにより250~350kmの観測幅を実現している。ALOS/PALSARにおける高分解モードの主な性能を表1に示した。

なお、ALOSは2011年5月12日をもって運用終了している。



軌道	種類	太陽同期準回帰軌道	
	高度	約690km	
	回帰日数	46日	
	傾斜角	約98°	
アンテナサイズ	8.9m × 3.1m		
オフナディア角	8~60°		
モード	FBS	FBD	
バンド幅	28MHz	14MHz	
偏波	HH/VV	HH+HV/VV+VH	
分解能	7~44m	14~88m	
観測幅	40~70km		

(左) 図 1.7 ALOS のイメージ (© JAXA)

(右) 表 1 ALOS/PALSAR における高分解能モードの主な性能

1.4.2 ALOS-2/PALSAR-2

陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) は ALOS の後継機として、2014 年 5 月 24 日に打ち上げられた。ALOS で利用された幅広い分野において発展的にミッションを引き継ぐことを主として、自然災害時の迅速な広域かつ詳細な観測への対応や国土情報の更新、森林観測を通じた地球温暖化対策等の現代のニーズに沿った衛星となっている。

ALOS-2 は搭載されているセンサーが PALSAR を高性能化させた PALSAR-2 のみで SAR 観測に特化した衛星となっている。PALSAR-2 は送信電力の強化、バンド幅の拡大、デュアルビーム方式などの新しい技術が採用されており、世界でもトップクラスの高性能センサーである。PALSAR-2 では、新たな観測モードであるスポットライトモードが追加され、観測幅は 25km 四方だが、その分解能は 1m×3m (Azimuth 方向×Range 方向) を達成する。高分解能モードにも PALSAR と同等な 10m モードのほかに 3m, 6m モードが追加され、広域観測モードも 490km まで観測幅が向上している。また、PALSAR-2 のアンテナ面は衛星の真下を向いており、観測時に衛星姿勢を変更することにより左右観測が可能になっている。これにより観測可能領域が 3 倍弱ほど拡大している。さらに、ALOS-2 の回帰日数は ALOS の 46 日に対して、14 日であるから、観測頻度も大きく向上しており、ALOS-2 は様々な場面での大きな活躍が期待されている。ALOS-2/PALSAR-2 におけるスポットライトモード及び、高分解モードの主な性能を表 2 に示した。



図 1.8 ALOS-2 のイメージ (© JAXA)

軌道	種類	太陽同期準回帰軌道				
	高度	約630km				
	回帰日数	14日				
	傾斜角	約98°				
アンテナサイズ		9.9m × 2.9m				
観測モード	スポットライト	高分解能				
		3m	6m	10m		
バンド幅	84MHz	84MHz	42MHz	28MHz		
分解能	1m × 3m	3m	6m	10m		
偏波※	SP	SP/DP	SP/DP/CP	FP	SP/DP/CP	FP
オフナディア角	8~70°	8~70°	8~70°	20~40°	8~70°	23.7°
観測幅	25m × 25m	50km	50	40	70	30

※SP: 単偏波 (HH/HV/VV), DP: 2偏波 (HH+HV, VH+VV), FP: フルポラメトリ (HH+HV+VH+VV), CP: コンパクトポラメトリ (実験モード)

表 2 ALOS-2/PALSAR-2 におけるスポットライト及び、高分解能モードの主な性能

1.5 本研究の目的

20 世紀半ば以降、地球規模で気温が上昇する地球温暖化が問題視されている。その主な原因は温室効果ガスにある。温室効果ガスといえば二酸化炭素が最も代表的であるが、その次に地球温暖化に及ぼす影響が大きいのがメタンである。本研究では、そのメタン等の温室効果ガスの放出に伴う二つの地殻変動に注目した。

一つ目は、メタンを主成分に含むガスを泥等とともに噴出する泥火山である。Etiope et al.

(2011)によると、世界の泥火山から放出される量は年間で10~20Mtもの量が推測されている。また、Etiope et al. (2004)によると、陸海含め1200以上もの泥火山が確認されている。しかし、泥火山の噴出のメカニズムはマグマ性の火山と比べて、多くは研究されていない。本研究では、泥火山が多く存在するアゼルバイジャンにおいて、SARの観測幅の大きさを活かし、InSARによる複数の泥火山の活動に伴う地殻変動の検出を試みた。アゼルバイジャンの泥火山におけるInSARによる先行研究は、欧州宇宙機関が打ち上げたENVISAT (Benedetta et al. 2014) とERS-2 (Scholte et al. 2003) によるもののみで、両研究とも地表変動を検出したという内容である。ALOS, ALOS-2による研究報告はない。

二つ目は、北半球陸地の1/4を占める永久凍土である。その大きさから、近年では永久凍土融解に伴う温室効果ガスの放出による気候等への影響も懸念されている。しかしながら、このような広範囲に分布する永久凍土地帯を地上レベルだけの観測でその詳細を把握するのは困難である。また、北極圏にはサーモカルストという地形が広く分布している。これは永久凍土が融解し、地盤沈下を伴い、湿地や湖沼を形成するものであるが、その形成過程の詳細はよくわかっていない。後述のように、2014年にロシアのヤマル半島で永久凍土の融解が原因と思われる沈没が発生したが、経年的な地盤変動の様子は全く分かっていない。InSARを用いれば、地盤沈下の進行を広域で捉えられると同時に、永久凍土の融解の進行やサーモカルスト形成過程をマッピングできる可能性がある。そこで最終的な目標は、地殻変動から温室効果ガスの放出量等を推定し、地球温暖化への影響の評価であるが、本研究では、InSARによりその第一歩である地殻変動（地盤沈下）の検出が目的である。

2 泥火山の活動に伴う地殻変動

2.1 泥火山

泥火山とは地下深部からメタン等のガスと共に水や泥を噴出し、山体のような円錐形や円形を形成したものである。その高さはcm~km単位のものと同様であり、長さも数kmにも及ぶものもある。その噴出の原因は、主に急激な堆積による未固結層の圧縮や粘土鉱物の脱水による異常間隙水圧であると考えられている。また、Mellors et al. (2007)によると、M5以上の地震かつ地震との距離が100km以内であるならば、地震が引き金となり、泥火山が噴出したり、活動が活発になったりすることが分かっている。Etiope et al. (2004)によると世界には陸上で900以上、海底で300以上の泥火山が見つかっている。そのうち陸上で200、海底160の泥火山がカスピ海に面するアゼルバイジャンで確認されている。メタンを含むガスを噴出することから、主に海底では石油やメタンハイドレートの存在の可能性を示すこと、温室効果による地球温暖化への影響が考えられ、資源及び環境の面で

泥火山の研究は重要である。2006年にはインドネシアで天然ガス掘削工事が原因となり突然泥火山が噴出し、泥が村を飲み込むという災害が発生している。また、日本国内では北海道新冠や新潟県室野(Takahashi et al. 2014)で報告がある。しかし、空間スケールが小さいため、衛星を用いた InSAR による検出は困難である。

2.2 観測地域

観測地域は 300 以上の泥火山が存在するカスピ海に面するアゼルバイジャンである。アゼルバイジャンはカフカス山脈南東部に位置している。カスピ海には油田があり、石油、天然ガスと資源が非常に豊富な国である。観測地域は図 2.1 の通りである。また、アゼルバイジャンにおける泥火山のメカニズムは図 2.2 で表される。

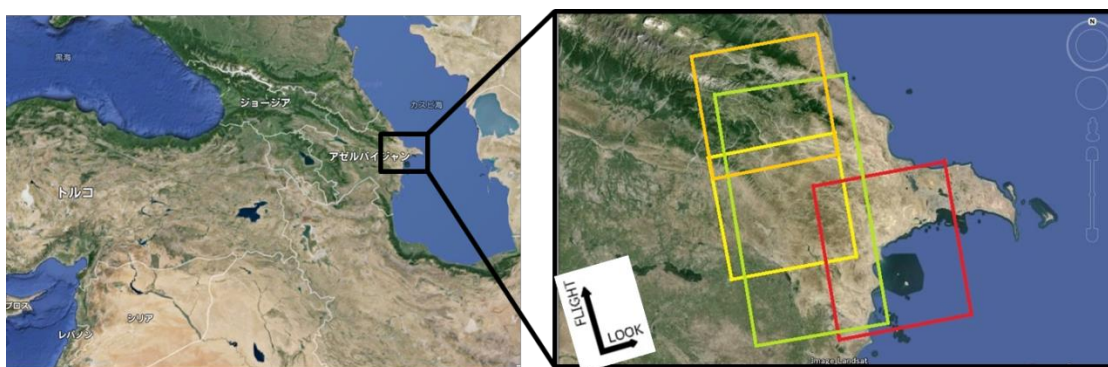


図 2.1 観測地域(Google Earth より、これ以降も全て Google Earth)

PATH_FRAME は黄枠 : 176_800 橙枠 : 176_810 赤枠 : 572_790 緑枠 : 573_790and800

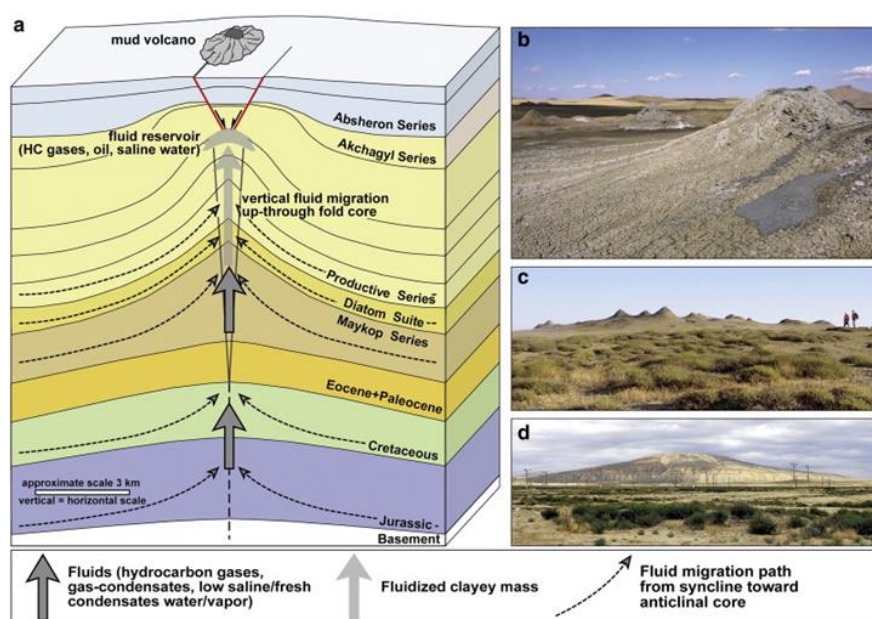


図 2.2 (左)アゼルバイジャンにおける泥火山のメカニズム (右)泥火山の例
(Bendetta Antonielli et al. 2014 より引用)

2.3 研究データ

本研究で使用した ALOS/PALSAR 及び ALOS-2/PALSAR-2 のデータと干渉性の良し悪し（コヒーレンス）に影響する垂直基線長 B_{perp} と期間（時間基線長とも呼ばれる）をパス_フレームごとに表 3 にまとめた。これらは全てアセンディング（北行軌道）である。表中の YYYYMMDD は年月日を表す。地形縮除去に用いた DEM は経済産業省(METI)及び NASA が作成した 30m メッシュの ASTER GDEM（全球 3 次元地形データ）と JAXA が作成した 30m メッシュの AW3D30（ALOS 全球数値地表モデル 30m 版）の二つである。これは観測対象の大きさが SAR の観測幅に比べて非常に小さいので DEM による誤差と地殻変動を見極めやすくするためである。SAR データの解析には GAMMA 社が開発した GAMMA Software を用いた。 B_{perp} の値は Master の軌道データを基準にしている。

PATH_FRAME : 176_800 (ALOS-2/PALSAR-2)			
No.	YYYYMMDD_YYYYDDMM (Master) (Slave)	B_{perp} (m)	Span(day)
1	20140917_20150708	123	294

PATH_FRAME : 176_810 (ALOS-2/PALSAR-2)			
No.	YYYYMMDD_YYYYDDMM (Master) (Slave)	B_{perp} (m)	Span(day)
1	20140917_20150708	122	294

PATH_FRAME : 572_790 (ALOS/PALSAR)			
No.	YYYYMMDD_YYYYDDMM (Master) (Slave)	Bperp(m)	Span(day)
1	20070613_20090618	-714	736
2	20080315_20100321	-843	736
3	20090618_20091103	688	138
4	20100321_20100806	477	138

PATH_FRAME : 573_790and800 (ALOS/PALSAR)			
No.	YYYYMMDD_YYYYDDMM (Master) (Slave)	Bperp(m)	Span(day)
1	20080702_20090820	108	414

表3 InSAR 解析に用いたデータ

2.4 解析結果

InSAR 解析の結果を DEM ごとに図 2.4~2.10 に示した。なお変動量を表すカラースケールと Azimuth 方向（衛星進行方向）、Range 方向（電波照射方向もしくは衛星視線方向）は全て図 2.3 の通りである。+方向へのカラー変化は地表面が衛星視線方向から遠ざかること、-方向へのカラー変化は衛星視線方向から遠ざかることを示す。

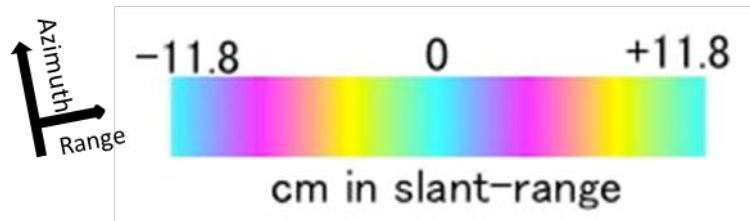


図 2.3 Azimuth, Range の方向と変動量を表すカラースケール

SAR の観測幅に比べて泥火山が非常に小さいので、まず全体の InSAR 画像を示した後に、色ごとの丸で示した泥火山ごとに表示する。なお、二つの DEM からの InSAR 結果と Google Earth とを照らし合わせた結果、泥火山による地殻変動の可能性が高いものを抽出し、丸をつけている。

PATH_FRAME : 176_800

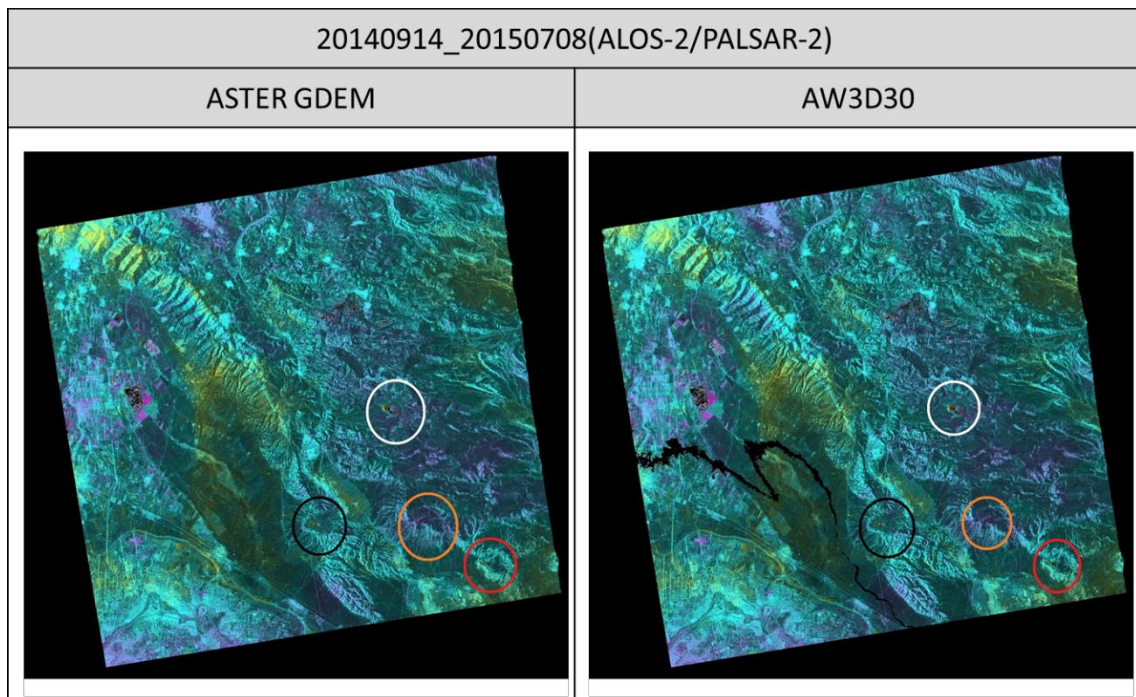


図 2.4 白, 黒, 橙, 赤丸で変動を検出

PATH_FRAME : 176_810

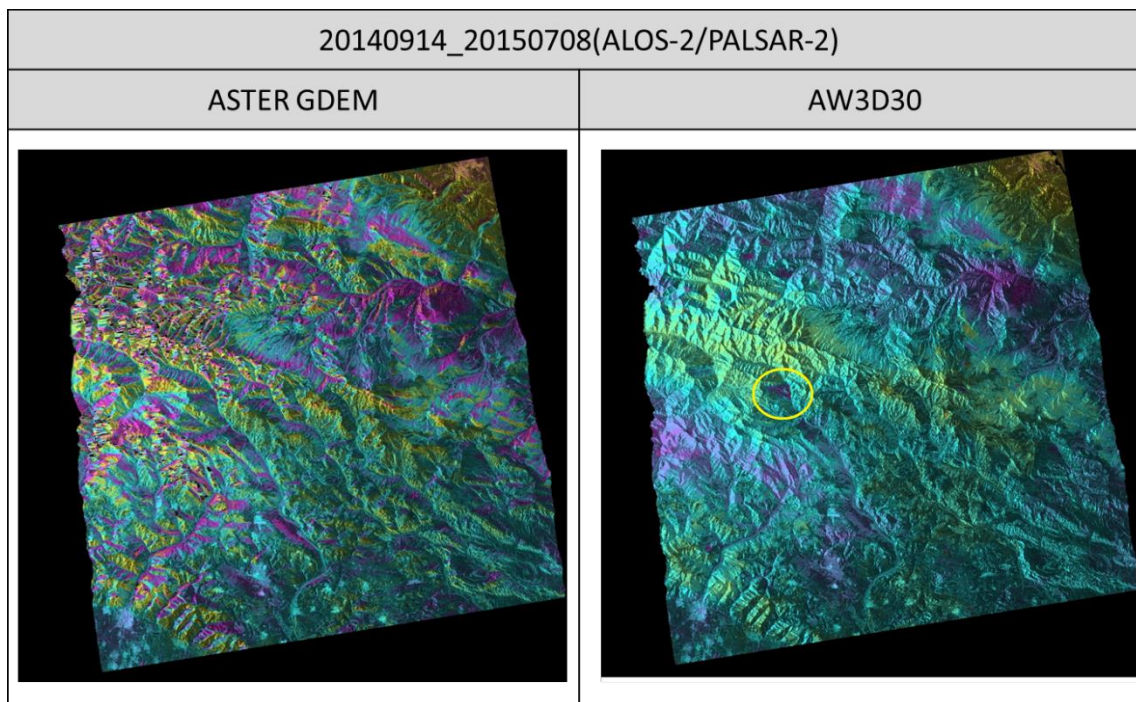


図 2.5 黄丸で変動を検出. ASTER GDEM での干渉画像は DEM によるものと思われる誤差がのってしまっている.

PATH_FRAME : 573_790and800

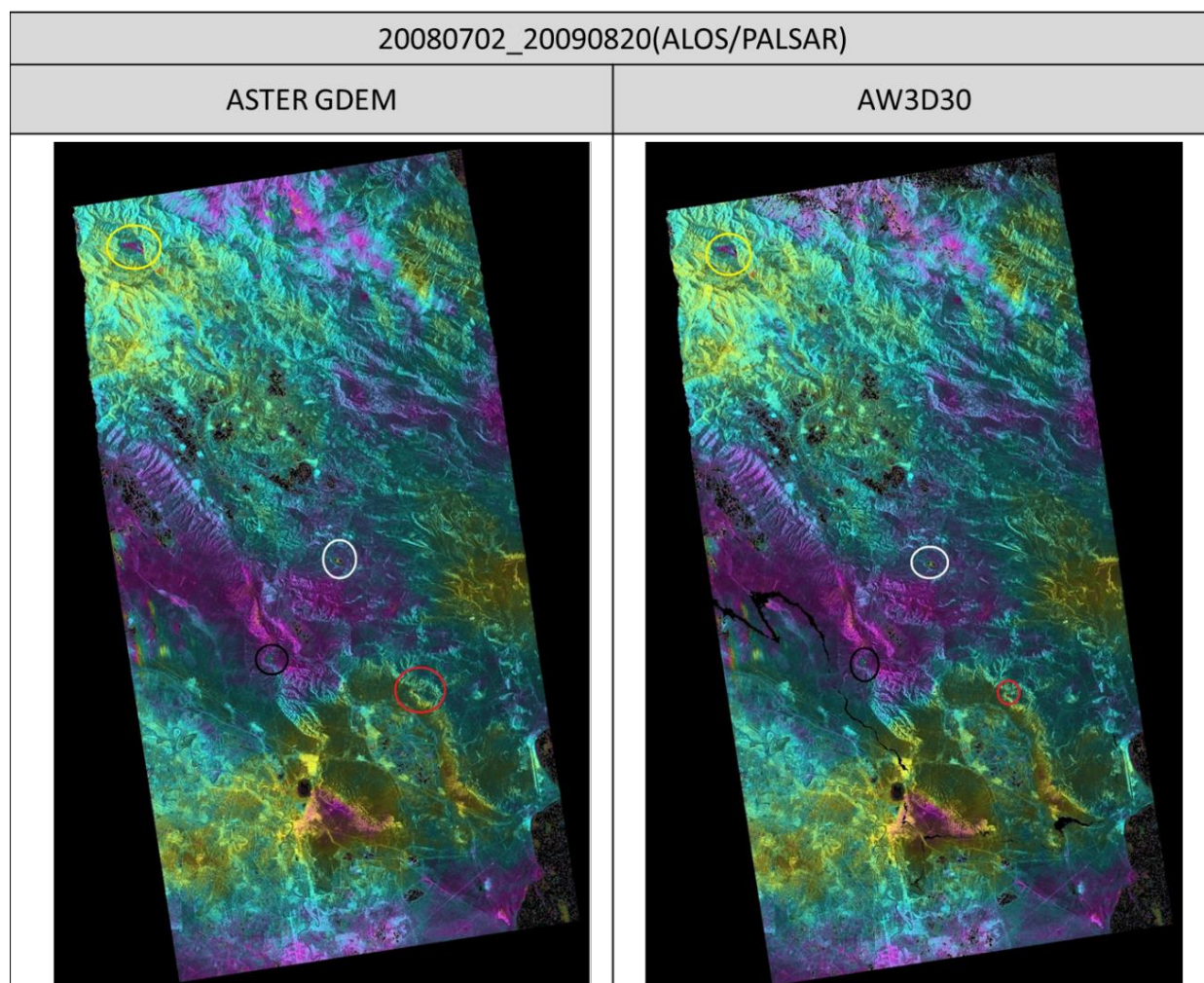


図 2.6 白、黒、赤、黄丸で変動を検出

PATH_FRAME : 572_790

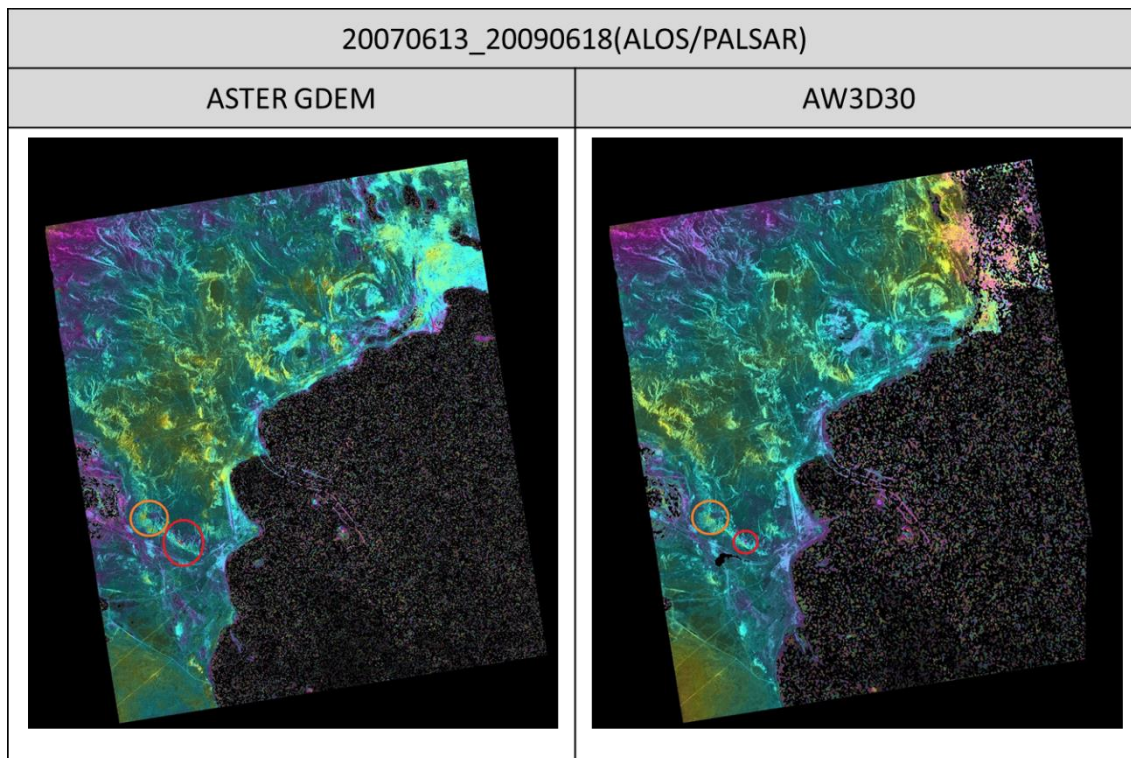


図 2.7 橙, 赤丸で変動を検出. AW3D30 の北東部分が欠けてしまっているのは干渉が上手くいっていない.

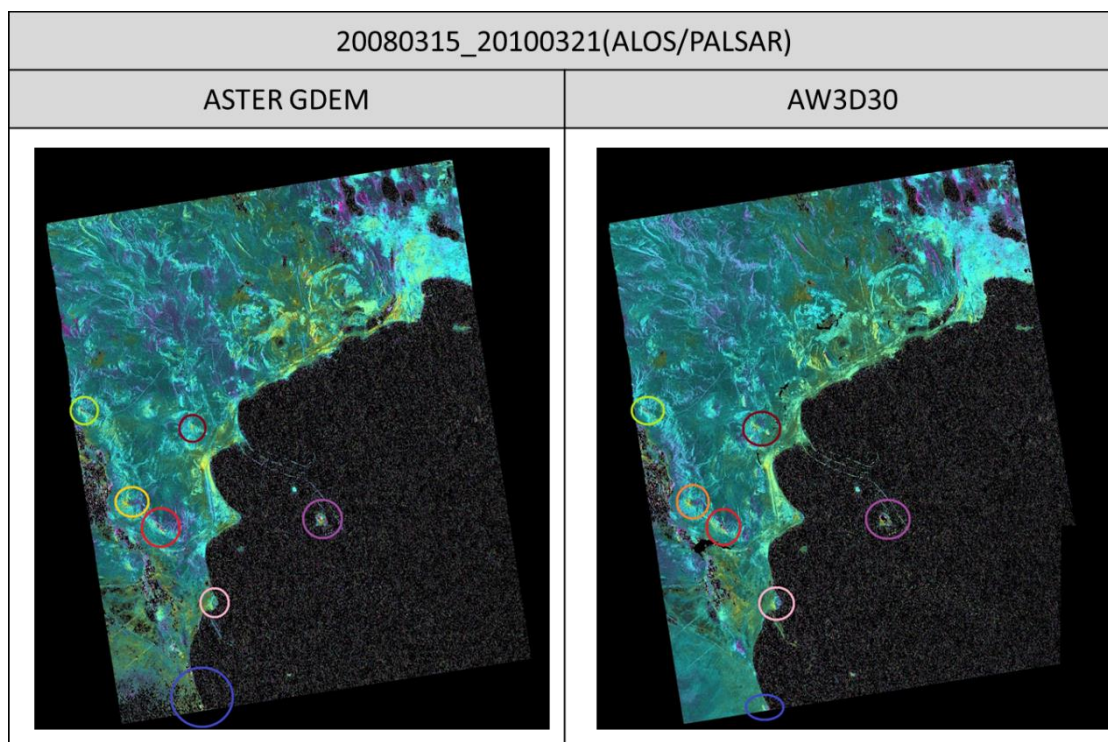


図 2.8 赤, 橙, 紫, こげ茶, 黄緑, 桃. 青丸で変動が検出

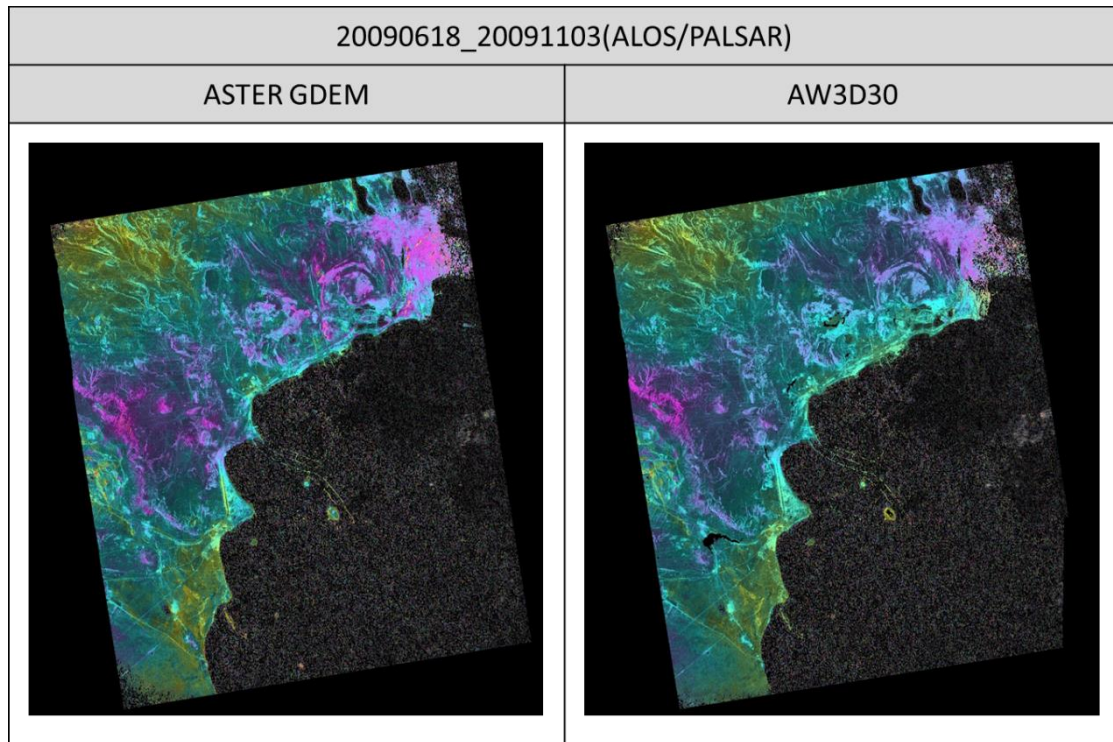


図 2.9 このペアの干渉画像では特に変動は見られなかった。

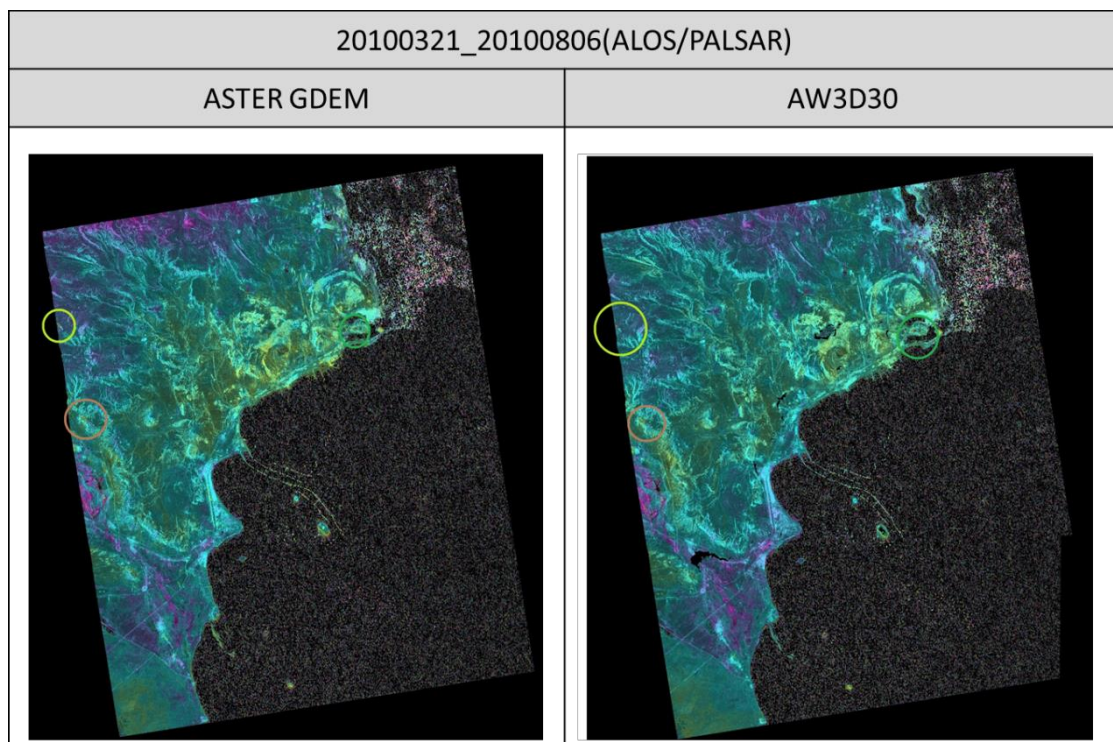


図 2.10 黄緑，茶，緑丸で変動が検出．北東部分のざらざらしている部分は干渉が上手く

っていない。

丸の色ごとの泥火山の拡大画像と変動の詳細を図 2.11~図 2.21 に示した。泥火山のスケールは Google Earth の画像に載せた通りである。

なお、一の変動が視線方向へ近づくことを示し、+の変動が視線方向から遠ざかる方向を示す。また、DEM の欠陥があった図 2.18 の画像以外は全て AW3D30 での結果を載せている。

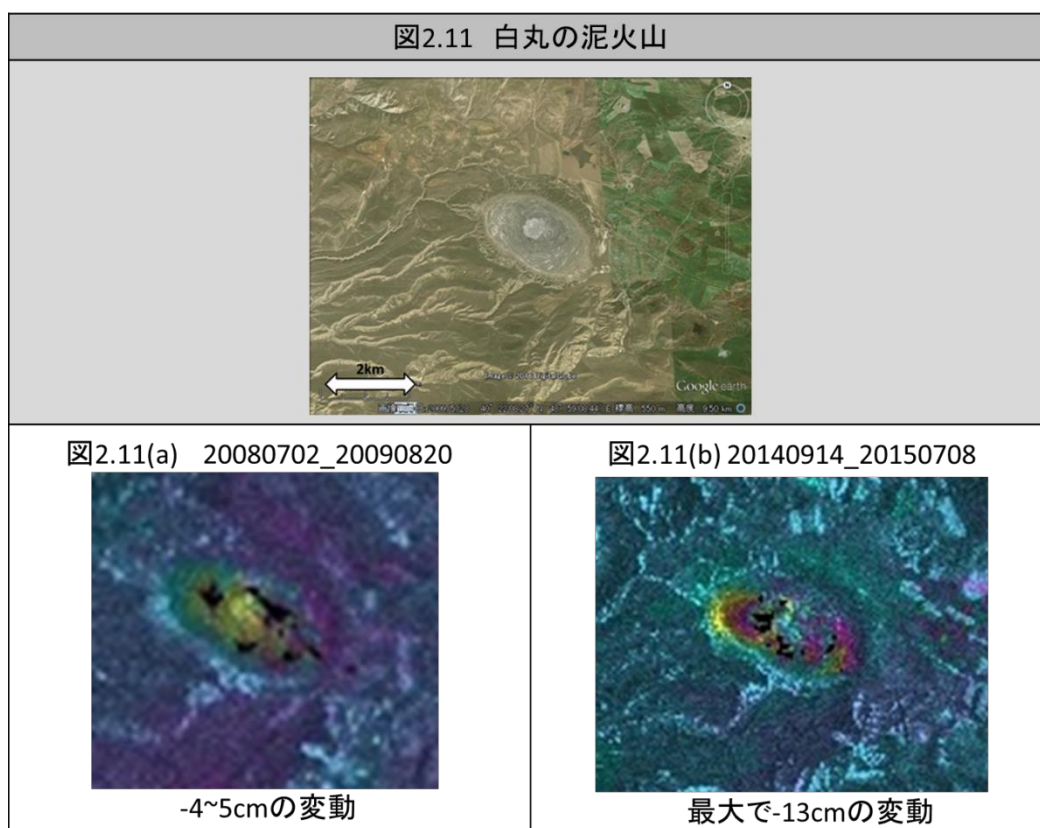


図2.12 黒丸の泥火山

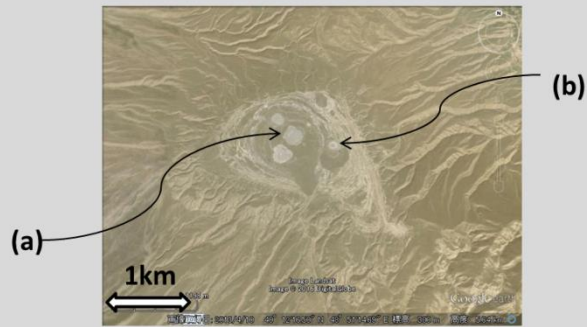
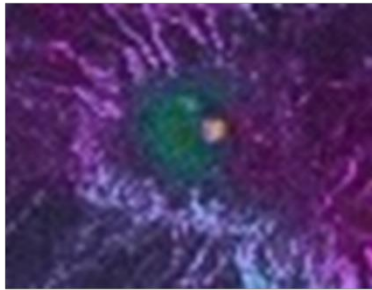
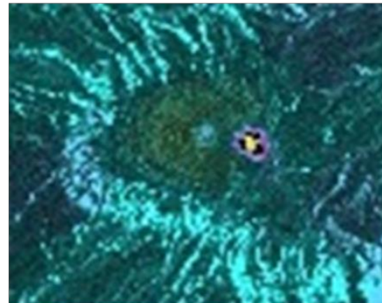


図2.12(a) 20080702_20090820



(a)の部分で+7cmほどの変動

図2.12(b) 20140914_20150708



(b)の部分で-4cm程度の変動

この泥火山では強度画像でも顕著な変化がみられた. 図 2.12(d)中の黒丸で囲まれた領域の白い部分は図 2.12 の(b)の部分と一致することが分かる. この期間の間に新しくできた噴出孔だと思われる.

図2.12(c) 20080702

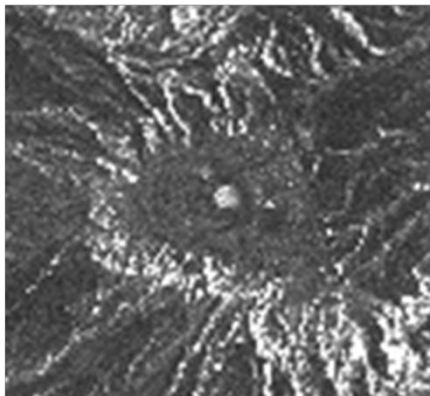


図2.12(d) 20140914

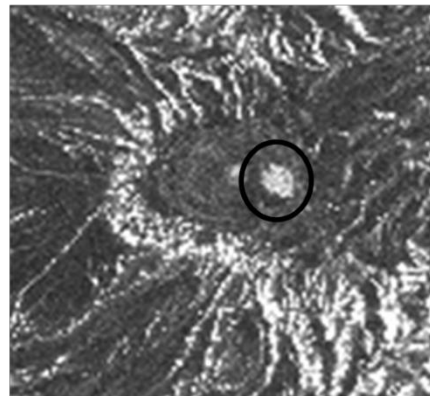
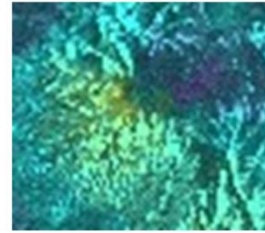


図2.13 橙丸の泥火山

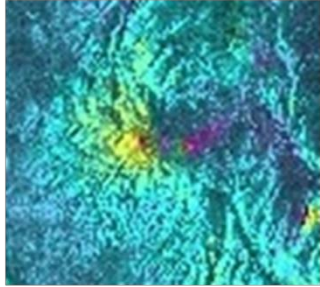


図2.13(a) 20070613_20090618



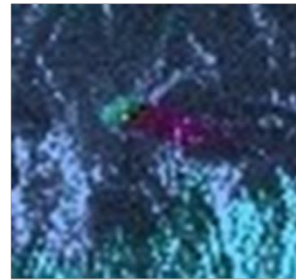
約-3cmの変動

図2.13(b) 20080315_20100321



約-6cmの変動

図2.13(c) 20140914_20150708

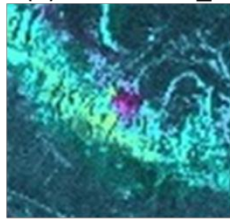


約+4cmの変動

図2.14 赤丸の泥火山

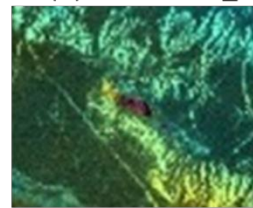


図2.14(a) 20070613_20090618



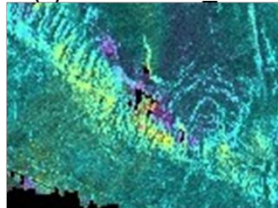
約+3cmの変動

図2.14(b) 20080702_20090820



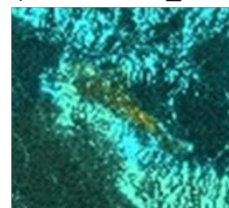
約-6cmの変動

図2.14(c) 20080315_20100321



約-3cmの変動

図2.14(d) 20140914_20150708



約-3cmの変動

図2.15 こげ茶丸の泥火山

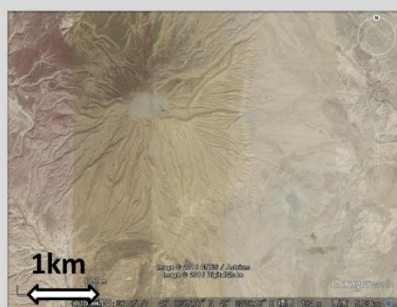


図2.15(a) 20080315_20100321

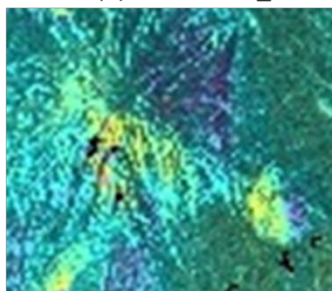
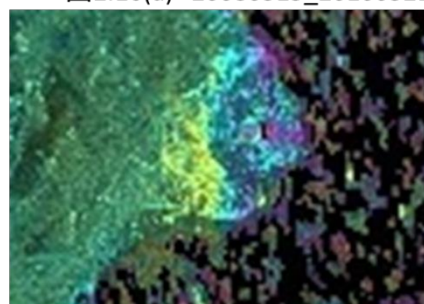


図2.16 桃丸の泥火山



図2.16(a) 20080315_20100321

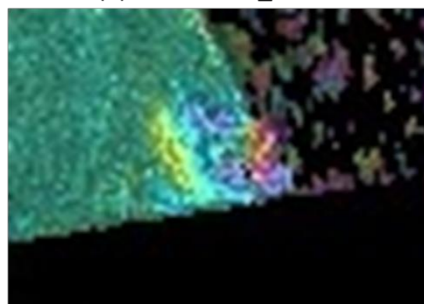


約-3cmの変動

図2.17 青丸の泥火山



図2.17(a) 20080315_20100321

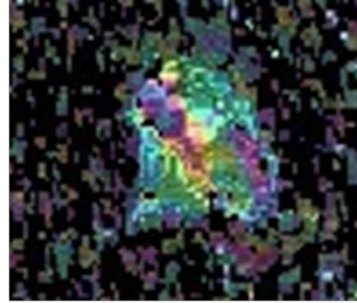


最大で約-10cmの変動

図2.18 紫丸の泥火山



図2.18(a) 20080315_20100321

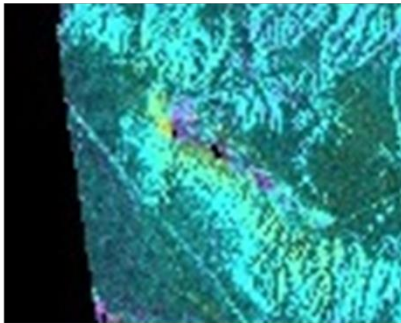


最大で約-12cmの変動

図2.19 黄緑丸の泥火山

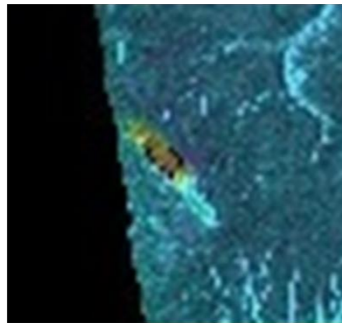


図2.19(a) 20080315_20100321



約-3cmの変動

図2.19(b) 20100321_20100806

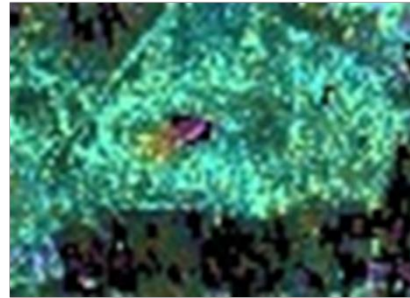


約-8cmの変動

図2.20 緑丸の泥火山



図2.21(a) 20100315_20100806

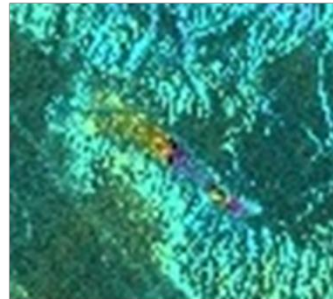


約-6cmの変動

図2.21 茶丸の泥火山



図2.21 20100315_20100806



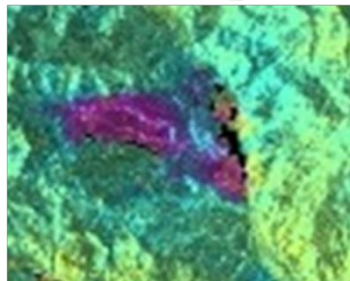
約-6cmの変動

図2.22 黄丸の泥火山



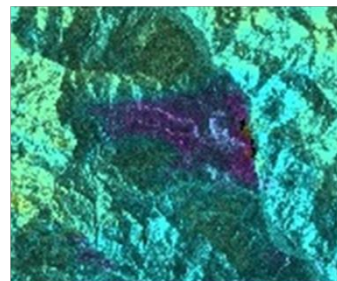
変動部分は
黒の直線の
斜面内

図2.22(a) 20080702_20090820



斜面上部で+5cmの変動

図2.22(b) 20140914_20150708



斜面で約+2cm,谷で+8cmの変動

2.5 圧力源の推定

圧力源モデルの一つに茂木モデル(1958)がある。茂木モデルは一般的に火山現象に対して用いられるもので、泥火山に対して茂木モデルが用いられた例は無い。茂木モデルは、地下に球状の圧力源があると仮定し、地殻変動の変動量を解析的に与えるモデルである。その計算値と観測地との比較から、圧力源の深さ及び体積変化量を推定するものである。茂木モデルは式(11)で与えられ、図 2.22 のようにある深さ d における半径 α を圧力源が ΔP の圧力変化をしたときの地表変位で与えられる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \alpha^3 \Delta P \frac{(1-\mu)}{G} \begin{pmatrix} \frac{x}{R^3} \\ \frac{y}{R^3} \\ \frac{d}{R^3} \end{pmatrix} \quad (11)$$

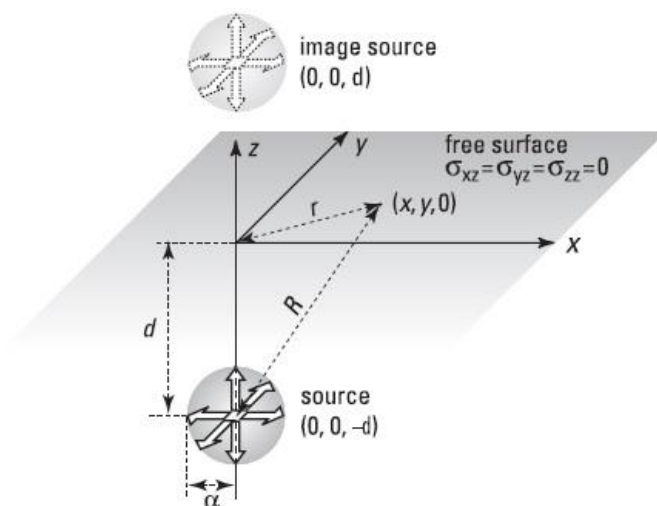


図 2.23 地表変動と圧力源の深さ，体積変化量との幾何学的な関係
(Michael Lisowski, 2006)より引用

ここで、 $(u \ v \ w)$ は点 $(x \ y \ 0)$ からの変位， α は圧力源の半径， ΔP は圧力変化， μ はポアソン比， G はラメの弾性定数， d は圧力源の深さ， $R = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}$ を示す。

変動が比較的に大きかった図 2.1 内の図 2.4 の泥火山の地殻変動に対して、試行錯誤的に茂木モデルによる計算を行った。図 2.11(b)の泥火山の地殻変動の LOS 変位(cm)に変換した図は下の図 2.24 のようになった。

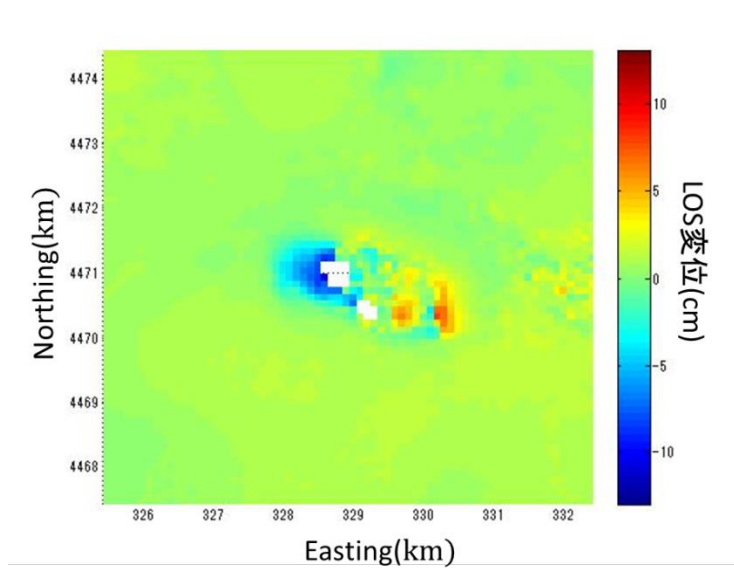


図2.24 図2.11(b)の泥火山の変動のLOSの変位
UTM座標で示している。

これに対して茂木モデルにより得られた図は以下のようになった。

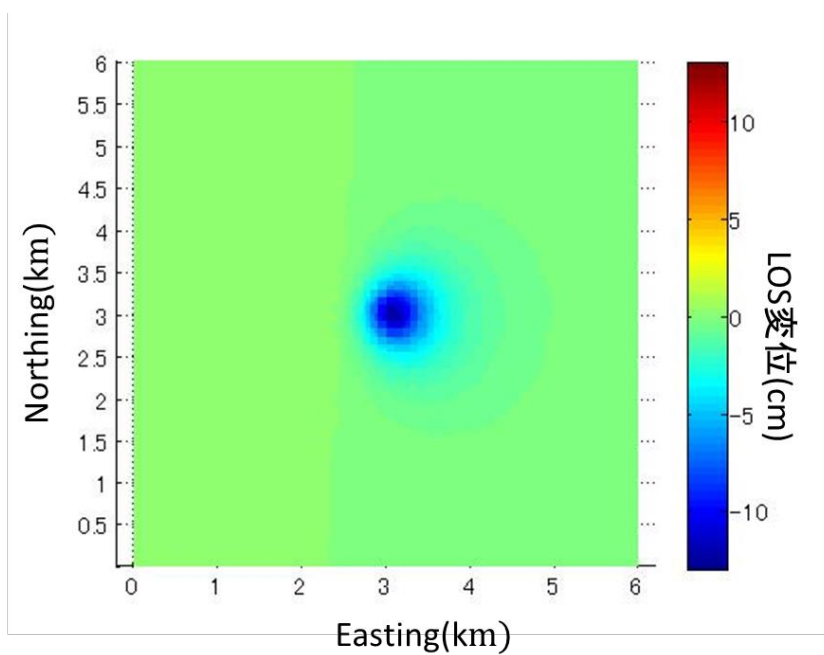


図2.25 茂木モデルによる推定結果

結果は、圧力源の深さが 400m、体積変化量が $1.0 \times 10^5 \text{m}^3$ と推定された。

2.6 考察

InSARにより、ある程度大きさのある泥火山の活動に伴う地殻変動が検出された。また、SARの観測幅の広さを活かし、一度に多くの泥火山の検出に成功した。そのほとんどが3~6cm程度の視線方向に近づく変動であり、最大で約13cm視線方向に近づく変位も見られたことから。アゼルバイジャンの泥火山は活動が活発であり、そのほとんどで地下圧力源が大きくなり体積が膨張していると考えられる。LOS変位に変換した図2.24の泥火山の地殻変動の結果では、西側は視線方向に近づいているため、隆起していると思われるが東側の変動は視線方向から遠ざかっている結果になった。これは、地表が隆起したとしても、衛星はななめ下を見ているために視線方向から遠ざかるという結果に成りえるので問題ない。同じような考え方が図2.22の泥火山にも当てはまると考えられる。泥火山と書いてあるが画像を見ただけでは判断できなかった。衛星視線方向から遠ざかる結果が出たが、谷の白い部分に注目すると、地殻変動の検出された地域で明らかに谷の白い部分が、斜面からの影響により埋もれてしまっていることが分かる。したがって、泥火山が噴出して斜面に沿って流れ出たか、地滑り等の別のことが発生したかもしれないが、何かが斜面にそって東側に流れていったことはほぼ間違いないであろう。また、本研究で用いたデータが全てアセンディングのデータであったので、ディセンディングデータを解析してみれば、新しい発見があるかもしれない。

また茂木モデルの推定により、圧力源の深さは400m、体積変化量は $1.0 \times 10^5 \text{m}^3$ と推定された。InSARにより検出された泥火山の変動に対して、茂木モデルを用いて地下圧力源の推定を行った例は他になく、新しい知見である。

3 永久凍土に伴う地殻変動

3.1 北極圏とサーモカルスト

永久凍土は環北極陸域のほぼ全域に分布し、北半球の陸地の約 24%を占めている。さらに Tarnocai et al. (2009) によると、永久凍土中に存在する有機炭素の総量は 1700Gt と推定され、この量は陸上の有機炭素の約半分、大気中の炭素量の 2 倍に相当する。これほどまでに広大な面積を有しながら地下氷融解に伴う温室効果ガスの放出や大気、植生などと複雑なやり取りをしているため、永久凍土の変動には注目せざるを得ない。しかし、まだまだ永久凍土に関する科学的知見は不足しているうえに、今後の変動の予測は難しい。その理由は永久凍土の空間の不均一性が大きいことや、衛星からのリモートセンシングが困難だとされてきたからである。

北極圏ではサーモカルストといわれる地形が多く存在する。サーモカルストとは、地表変化を伴う永久凍土の融解の末に出来た凹地に湖沼や湿地を形成した地形である。こうした変化は、数十から百年単位の長い時間を要するが、その過程で何万年と地下水で固定化されていた有機炭素が地上に放出されることによる影響は計り知れない。

しかし、近年では衛星観測技術の向上により、サーモカルスト等による地表面変化の研究や地上観測では難しいシベリア平原全域における地殻変動のマッピングにより、有効な地上観測地点の選定などによる北極圏研究の大きな発展が期待されている。

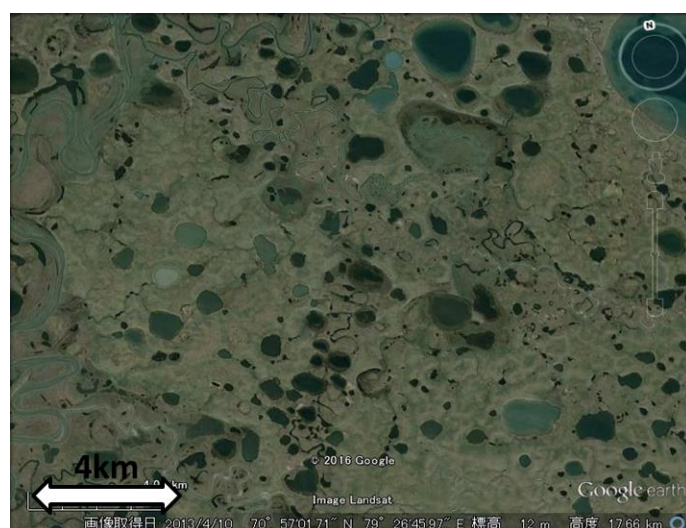


図 3.1 サーモカルスト地形の例

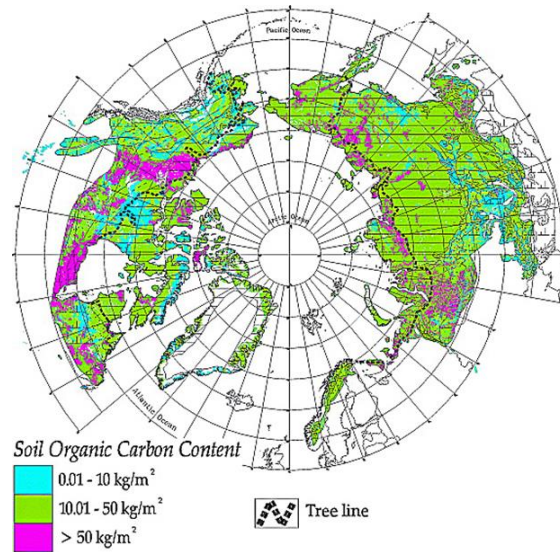


図 3.2 永久凍土中の有機炭素量の分布 (Tarnocai et al. 2009)

3.2 観測地域

観測地域は北西シベリアに位置するロシア，ヤマルネネツ自治管区のヤマル半島である。北極圏内に位置しているため冬季が 8 か月と長く，冬季平均気温は約 - 20 度，夏季平均気温は 12 度という厳しい環境である。また，この地域にはサーモカルスト地形が多く存在する。

2014 年 7 月にヤマル半島で突如直径 30m にも及ぶ穴が発見された。この穴の底付近のメタン濃度が通常の 10^4 以上あることから，永久凍土の融解が原因だと考えられている。しかし，経年的な地盤変動の様子は全く分かっていない。

この地域一帯は非常に資源が豊富であり，同自治区の天然ガス埋蔵量は全世界の 22%とされている。さらに近年ではヤマル LNG プロジェクトという事業始まり，国をあげて同地域のエネルギー資源開発が進められている。

詳しい範囲は図 3.3 に示した。

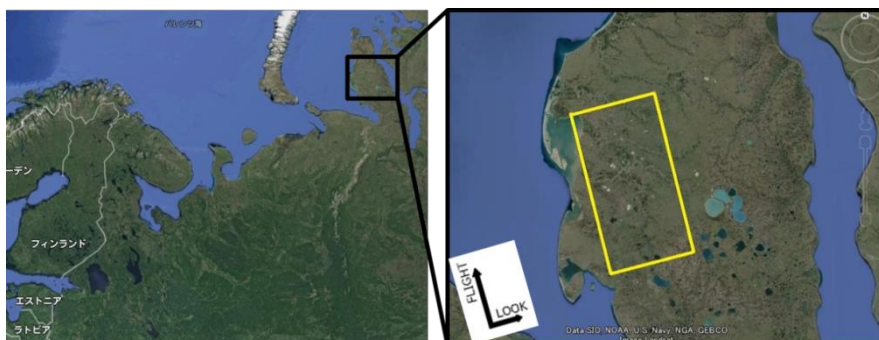


図 3.3 観測地域 PATH_FRAME : 517_1400and1410

3.3 研究データ

本研究で使用したALOS/PALSARのデータと干渉のコヒーレンスに影響するBperpと期間をパス_フレームごとに表4にまとめた。これらは全てアセンディング（北行軌道）である。地形縮除去に用いたDEMは経済産業省(METI)及びNASAが作成した30mメッシュのASTER GDEM（全球3次元地形データ）を使用した。ALOS-2/PALSAR-2のデータでも解析を試みたが変動のようなものがあまり見られなかったことと電離圏の影響を大きく受けているため除外している。また、No.4のペアのみ2シーンを連結させて解析を行うと上手く干渉しなかったため1シーン毎に解析した。

PATH_FRAME : 517_1400and1410 (ALOS/PALSAR)			
No.	YYYYMMDD_YYYYDDMM (Master) (Slave)	Bperp(m)	Span(day)
1	20070714_20071014	972	92
2	20080831_20081016	834	46
3	20080716_20090719	-322	368
4	20071014_20100906	1169(517_1400) 1174(517_1410)	1058

表4 InSAR 解析に用いたデータ

3.4 解析結果

InSAR 解析の結果を図3.4~3.8に示した。なお変動量を表すカラースケールとAzimuth方向、Range方向は全て図2.3の通りである。

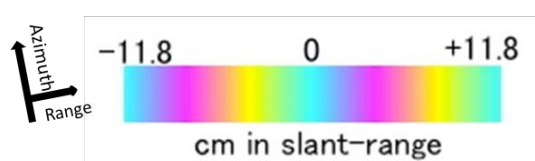


図2.3 Azimuth, Range の方向と変動量を表すカラースケール

PATH_FRAME : 517_1400and1410

图 3.4 20070714_20071014

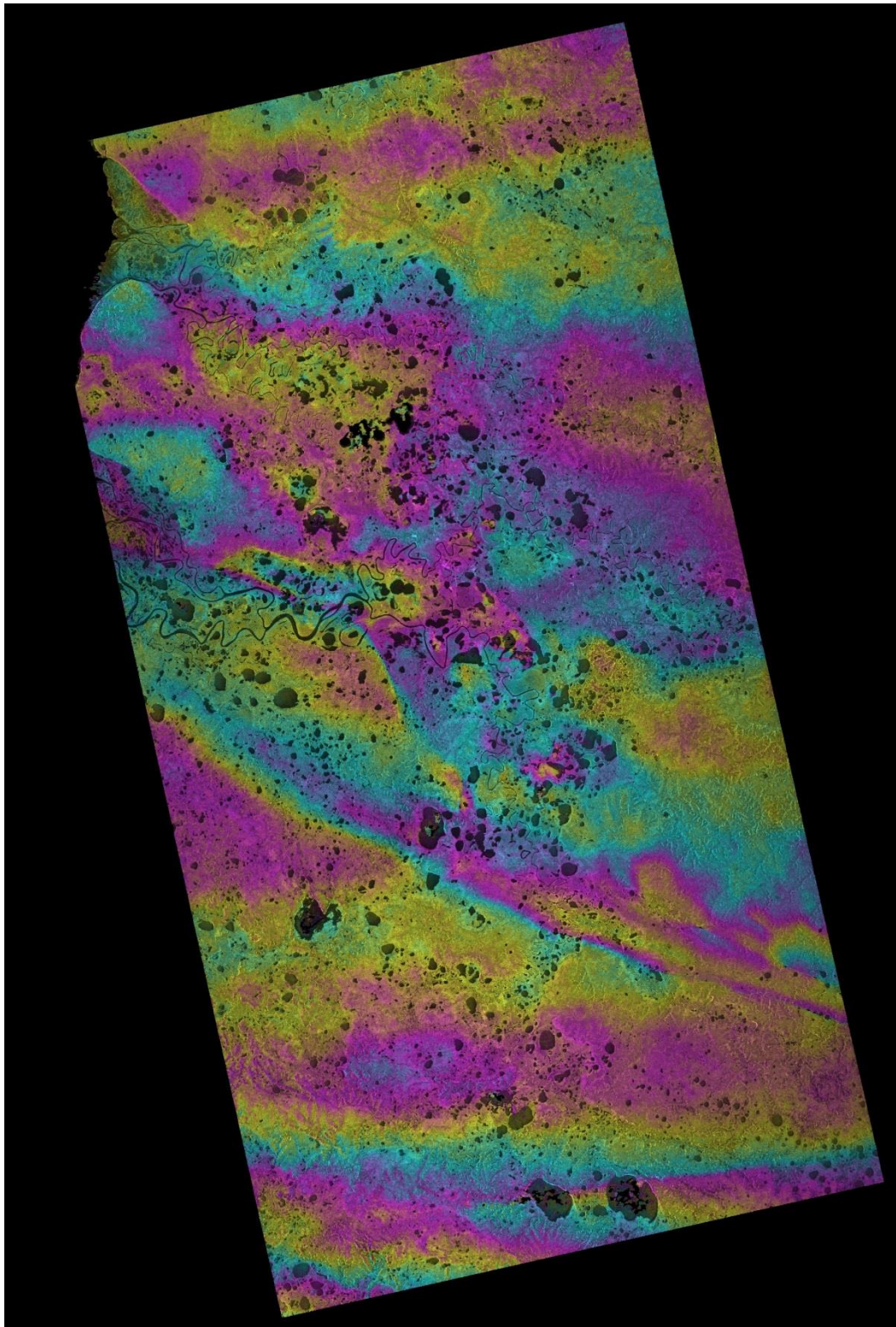


图 3.5 20080831_20081016

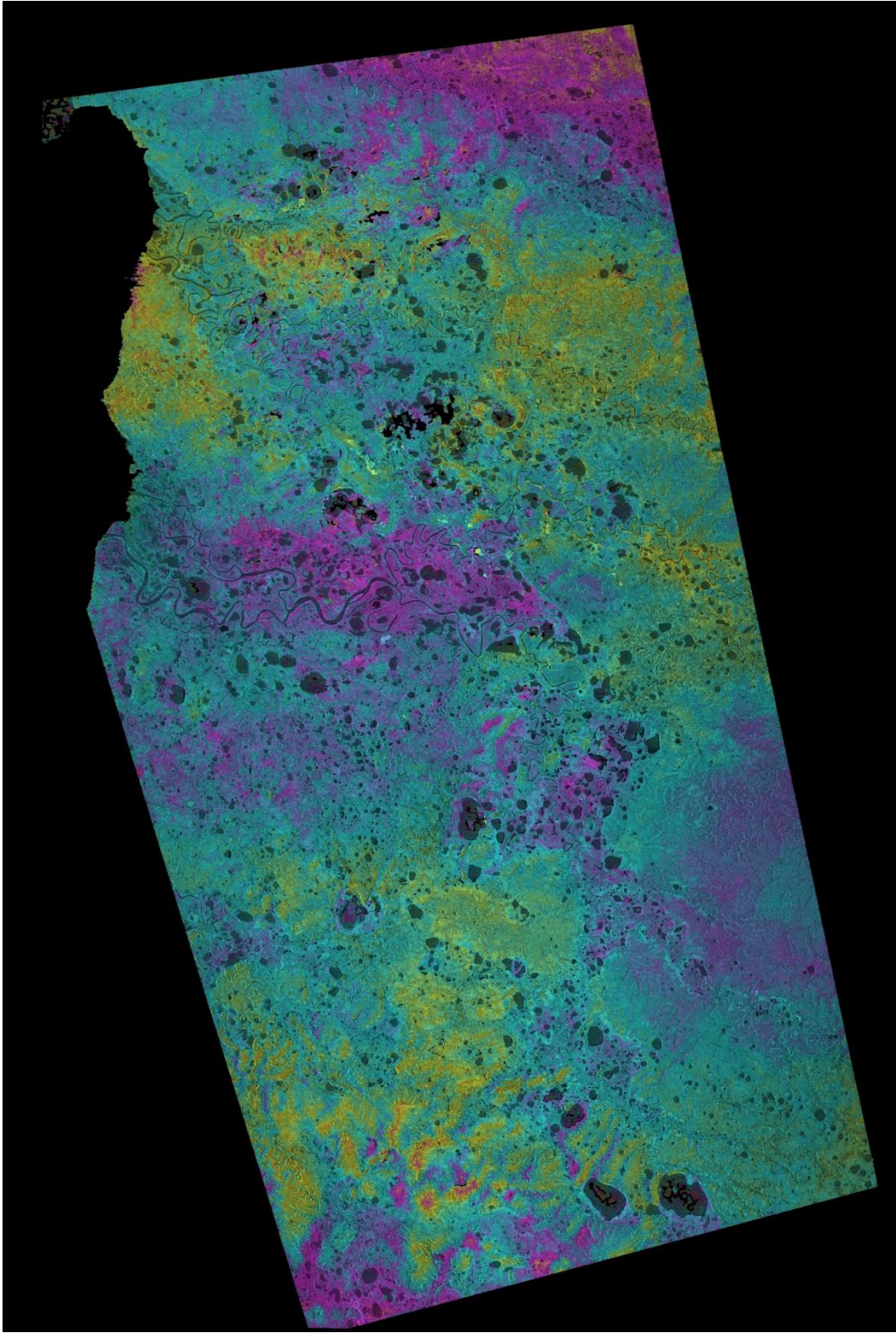
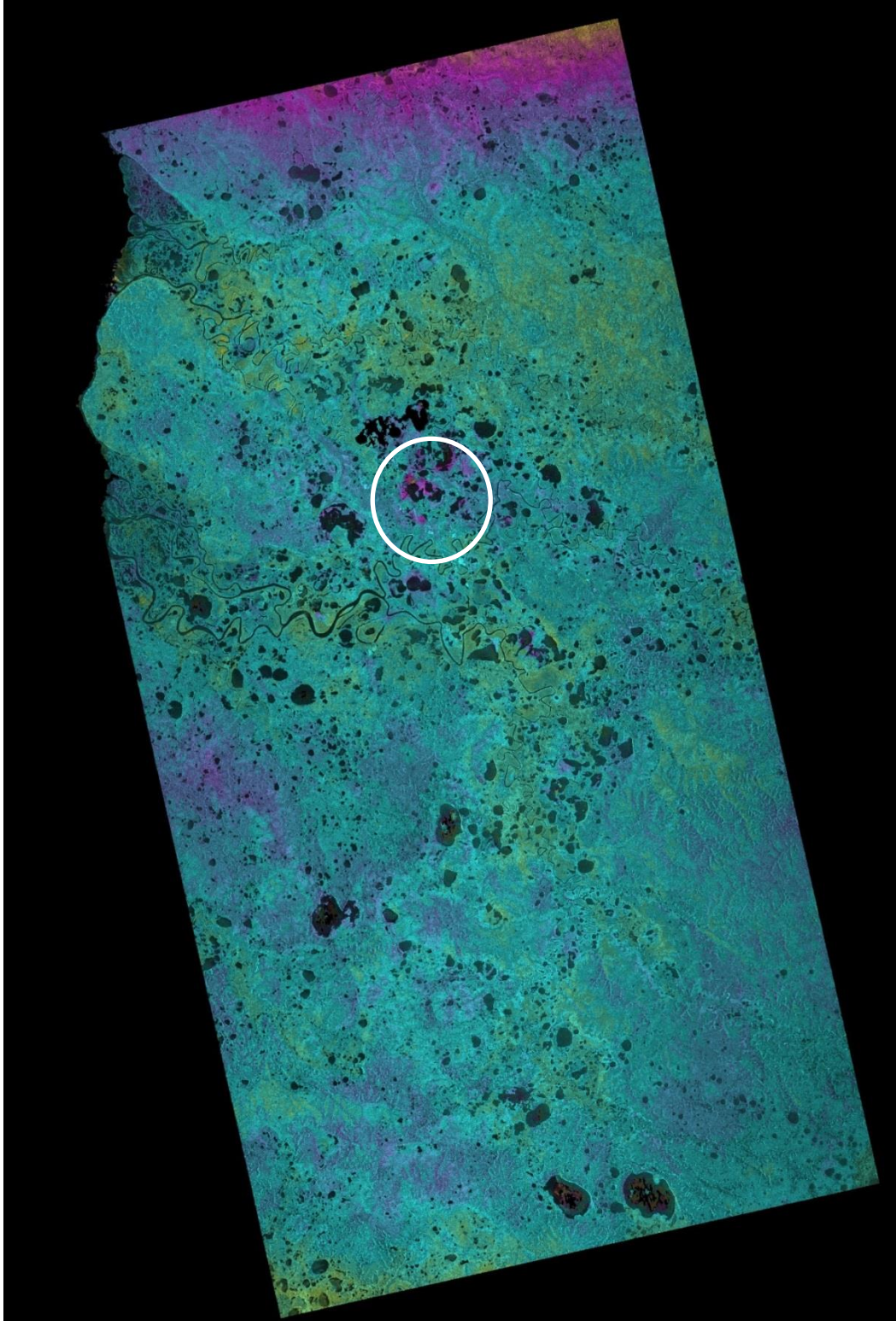
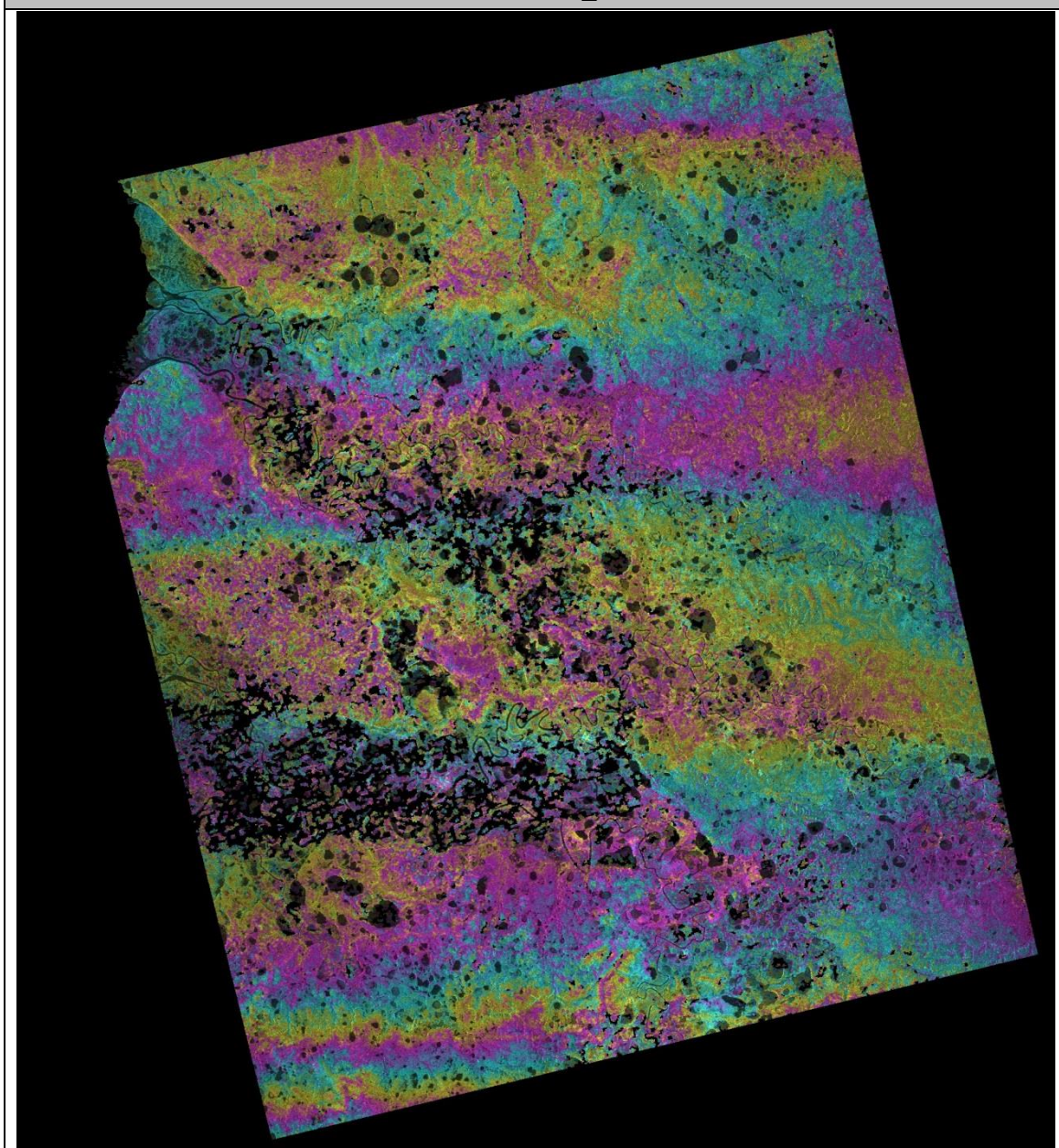


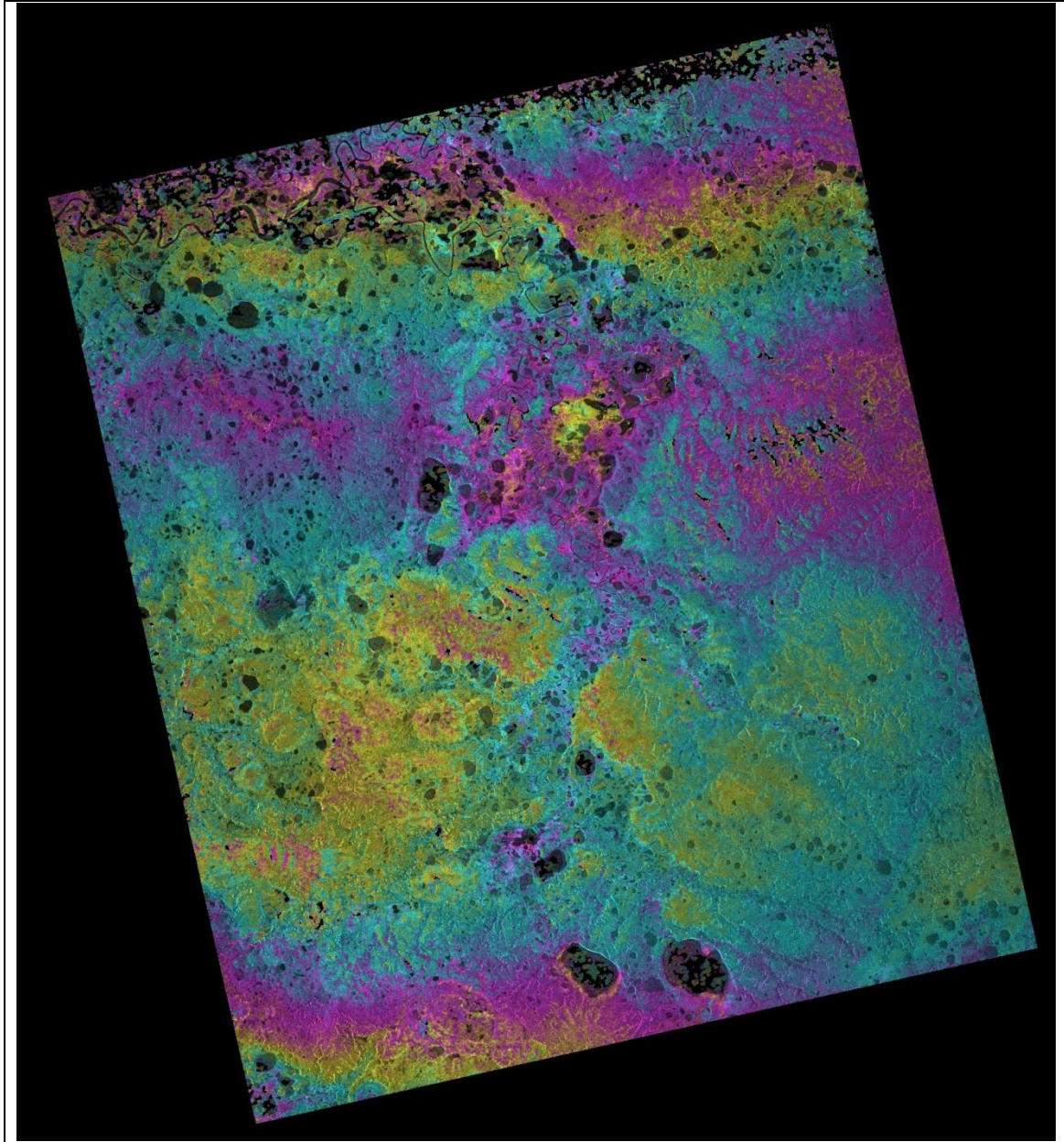
图 3.6 20080716_20090719





PATH_FRAME : 517_1410

☒ 3.8 20071014_20100906



3.5 考察

図 3.6 の白丸で囲まれた領域のサーモカルスト地形において、地殻変動を検出することが出来た。その変動量は最大で 6.4(rad)程度を示していたので、cm に変換すると最大で約 12cm という衛星視線方向から遠ざかるという結果が得られた。従来は、永久凍土地帯におけるリモートセンシングは難しいとされてきたが、近年の技術の発展もあり、ようやく緒に就いたというところであろう。しかし、ここに載せられなかったのもあるが、他の干渉画像を見ても分かるように、その大半は電離圏の影響やノイズが出てしまっている。今回の干渉画像でも電離圏の影響を上手く取り除くことが出来れば、地殻変動のシグナルが出てきそうなものもある。北極圏に位置する永久凍土地帯を、衛星を用いて観測、研究をするうえで、電離圏の影響というのはまず第一に考えなければならないだろう。

4 まとめ

アゼルバイジャンの泥火山の活動に伴う地殻変動及び、永久凍土地帯に広がるサーモカルスト地形における地盤沈下に伴う地殻変動を、InSAR を用いて検出した。InSAR により十数個の泥火山の活動に伴う結果から、アゼルバイジャン地帯における泥火山はいたる所で活発であり、約 2 年間で数 cm ～十数 cm という変動量がほとんどであるが、その多くが衛星視線方向に近づくような変動、またはアセンディングに対して、山の東側の斜面では衛星視線方向から遠ざかるような変動が見て取れた。InSAR で捉えきれない大きさの泥火山も多々あることを考えると大量のメタンガスを出すことから、今後の環境への影響も大きいだろう。

InSAR による泥火山の活動に伴う地殻変動のシグナルから、一般的に火山のモデリングに用いられる茂木モデルを用いて圧力源の推定を試みた結果、圧力源の深さは 400m、体積変化量は $1.0 \times 10^5 \text{m}^3$ と推定された。

永久凍土地帯では、北西シベリアに位置するロシアのヤマル半島のサーモカルスト地形において地殻変動の検出を試みた。図 3.6 での結果の通り、サーモカルストの地盤沈下に伴う局所的な地殻変動を検出することに成功した。白丸で示した場所以外でも大きくはないが、特に湖沼の周りで地殻変動のようなシグナルを確認することが出来る。しかし、上手く検出できたのはその 1 ペアのみで ALOS-2 のデータを含む多くのペアで電離圏の影響が大きく出たり、積雪期のため干渉せずという結果になったりした。北極圏で SAR 衛星を用いた研究を発展させていくためにもまずは、電離圏の影響を取り除く方法を確立させるのが有効だと思われる。

5 謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々からご指導，ご協力を頂きました。

指導教員である古屋正人教授には，研究に関する初歩的なことを教えていただいたり，研究の方向性に関する助言を頂いたりとまだ1年間ですが大変お世話になりました。また，研究会にも参加させていただき，大変貴重な経験となりました。ありがとうございました。まだまだ至らない点ばかりですが，これからもご指導よろしく願いいたします。

また、宇宙測地学研究室の先輩方にも大変お世話になりました。SAR 解析に関することから発表に関する事など、非常に多くのことを教えていただき、感謝の気持ちしかありません、ありがとうございます。偉大な先輩方に少しでも近づけるように精進していく次第でありますのでこれからもよろしくお願い致します。

本研究で用いた PALSAR データは PIXEL(PALSAR interferometry Consortium to Study to Evolving Land surface)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す。PIXEL データの所有権は経済産業省および JAXA にあります。また，ASTER GDEM データは経済産業省及び NASA が作成したもの，AW3D30(ALOS 球数値地表モデル 30m 版)は JAXA が作成のものであり，これらに帰属します。

6 参考・引用文献

- C.Tarnocai, J.G.canadell, E.A.G Schuur, P.Kuhry, G Mazhitova, and S.Zimov (2009) : Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region, *Global Biogeochemical Cycles*, 23, GB2023, doi:10.1029/2008GB003327, 2009
- R.Mellors, D.Kilb, A.Aliyev, A.Gasanov, and G.Yetirmishli (2007) : Correlations between earthquakes and large mud volcano eruptions, *J.Geophys. Res.*, 112, B04304, doi:10.1029/2006JB004489, 2007
- L.Liu, K.M. Schaefer, A.C.Chen, A.Gusmeroli, H.A.Zebker, and T.Zhang (2015) : Remote sensing measurements of thermokarst subsidence using InSAR, *J.Geophys. Res, Earth Surf.*, 120, doi:10.1002/2015JF003599.
- Michael Lisowski (2006) : Analytical volcano deformation source models, Daniel Dzurisin (Eds.), *Volcano Deformation*, pp279-304
- Marco Bonini, Franco Tassi, Akper A.Feyzullayev, Chingiz S.Aliyev, Francesco Capecchiacci, Angelo Minissale (2013) : Deep gases discharged from mud volcanoes of Azerbaijan: New geochemical evidence, *Marine and Petroleum Geology* 43 (2013) 450-463
- G.Etioppe, A.Feyzullayev, C.L.Baciu and A.V.Milkov (2004) : Methane emission from mud volcanoes in eastern Azerbaijan, *Geology* 2004 ; 32 ; 465-468
- K.H.Scholte, A.Hommels, F.D.Van der Meer, S.B.Kroonenberg, R.F.Hanssen, E.Aliyeva, D.Huseynov, I.Guliev (2003) : Preliminary ASTER and InSAR Imagery Combination for Mud Volcano Dynamics, Azerbaijan, 3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy 2003, 379-385
- Beneddetta Antonielli, Oriol Monserrat, Marco Bonini, Gaia Righini, Federico Sani, Guido Luzi, Akper A. Feyzullayev, Chingiz S. Aliyev (2014) : Pre-eruptive ground deformation of Azerbaijan mud volcanoes detected through satellite radar interferometry (DInSAR), *Tectonophysics* 637 (2014) 163-177
- G.Etioppe, R.Nakada, K.Tanaka, N.Yoshida (2011) : Gas seepage from Tokamachi mud

volcanoes, onshore Niigata Basin(Japan): Origin, post-genetic alterations and CH₄-CO₂ fluxes, Applied Geochemistry 26 (2011) 348-359

Masato Furuya (2006) : InSAR: A NEW Trend in Crustal Deformation Measurement, Journal of the Geodetic Society of Japan Vol52, No.4, pp225-243, 2006

Atsushi Takahashi, Yoichi Fukuda, Shigekazu Kusumoto (2014) : Uplift revealed by LASER scanner surveys in Muroto mud volcano, Niigata Prefecture, Japan, and estimation of its source, San Francisco, AGU Fall Meeting, 15-19 December 2014

Katia Moskvitch (2014) : Mysterious Siberian crater attributed to methane, Nature News, Nature Publishing Group, Jul 31, 2014

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 第2版
東京電機大学出版

本格化するヤマル LNG プロジェクト : JOGMEC 石油・天然ガスレビュー 2013.7 Vol.47
No.4

北極環境研究の長期予想 : 北極環境研究コンソーシアム
2014年9月 発行 2015年3月改訂

JAXA HP http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index_j.htm

国土地理院 HP <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>

測地学テキスト <http://www.geod.jpn.org/web-text/index.html#gsc.tab=0>