

InSAR による十勝岳の地殻変動の検出

**Detection of crustal movement at Tokachidake
volcano by Interferometric SAR**

北海道大学 理学部地球科学科
宇宙測地学研究室

木下 陽平

Youhei Kinoshita

2008 年 1 月 30 日

概要

近年宇宙測地技術は著しく発達し、今では測地・測量において欠かすことのできないものとなっている。中でも 20 世紀後半から実用化されていった VLBI, SLR, GPS, SAR といったものはプレート運動や地殻変動の検出で活躍している。

現在地殻変動を検出する手段として InSAR と呼ばれる方法がある。InSAR のメリットは宇宙空間にある衛星のセンサーから電波を放射し、地表等の被写体から反射してきた電波を受信する能動型のレーダーであることと、観測する地域に観測点を設置することなく観測領域を面的に解析することができることである。これにより震源や火口の付近にわざわざ観測点を設置しに行くようなことも必要なくなり、どのような所で地震や噴火に伴う地殻変動が起こってもその分布を高い精度で上空から得ることが出来る。

本研究の目的は SAR データを干渉させてできる InSAR を用いて、現在北海道で火山活動のある十勝岳の周辺を 2006 年 9 月から 2008 年 11 月までの期間で解析し地殻変動の検出をすることである。十勝岳は北海道にある大雪山系の火山で最近では 1988 年と 2004 年に小噴火を起こしており現在も火山活動が活発な火山である。本研究では、衛星の ascending 側(北行軌道)の 2007 年 6 月から 2008 年までのデータと descending 側(南行軌道)の 2006 年 9 月から 2008 年 11 月までのデータを用いた。

また、解析した結果十勝岳の火口付近に地殻変動による局所的な膨張のシグナルが見られたため茂木モデル(1958)を用いて地下圧力源の深さ、規模の推定を行なった。茂木モデルにより推定された地下圧力源の深さは 1000m、体積変化量は $3 \times 10^7 m^3$ となった。

目次

1 はじめに

- 1.1 衛星による測地
- 1.2 合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar , SAR)
- 1.3 干渉 SAR(Interferometric SAR, InSAR)
- 1.4 十勝岳と火山性地殻変動
- 1.5 本研究の目的

2 十勝岳周辺の InSAR による解析

- 2.1 解析を行う領域
- 2.2 ascending の解析
- 2.3 descending の解析

3 地殻変動の見られる点の茂木モデル(1958)による地下圧力源の推定

- 3.1 茂木モデルとは
- 3.2 推定結果

4 考察と課題

5 謝辞

6 参考文献

1 はじめに

1.1 衛星による測地

近年の宇宙測地技術の進歩により地表観測における精度は向上し、現在では宇宙からの観測でも数メートルの空間分解能で地表を観測することができる。かつては空を見上げて天体の位置により位置を測定する天文観測によって位置計測を行っていたが、20世紀に入り様々な測地技術が新たに生み出され、用いられるようになった。1980年代に超長基線電波干渉法(Very Long Baseline Interferometry, VLBI, 図1)や人工衛星レーザー測距(Satellite Laser Ranging, SLR)が実用化されて位置計測の精度は飛躍的に向上し、1990年代にはGPS(Global Positioning System, 図2)が実用化されて位置計測の高精度化とともにGPS受信機間の基線長の変化なら数cmから数mmの精度で計測することが可能になった。また、1990年以前から合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar, SAR)を搭載した人工衛星が打ち上げられ昼夜天候を問わず地表を観測できるようになり、さらに観測時期の異なる二つのSARデータを干渉させてできる干渉SAR(Interferometric SAR, InSAR)の技術によって地上に観測点を設置することなく観測領域の地殻変動を数cmの精度で観測できるようになった。これによりGPSでは受信機間の基線長の変化しかできなかった地殻変動をより面的に高い空間分解能で検出することができる。

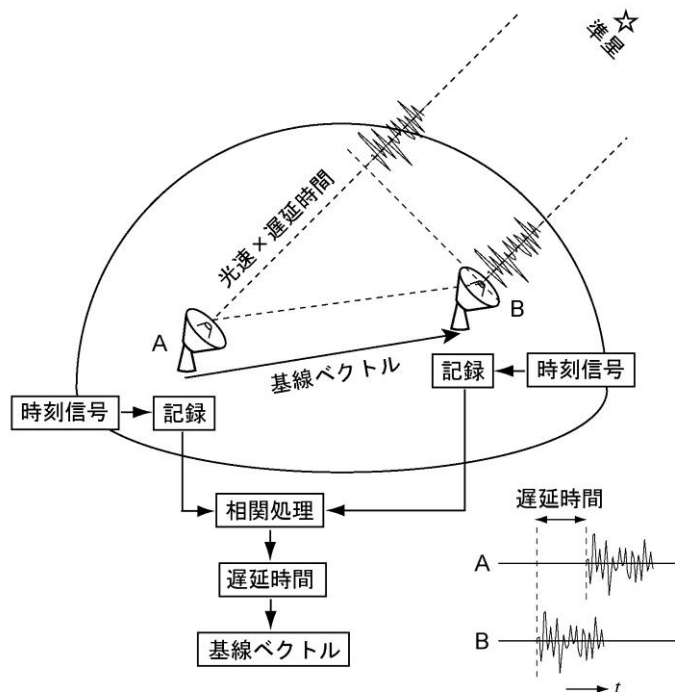


図1 VLBIの原理を示す図。クェーサー(準星)からの信号を2カ所のアンテナで受信しその遅延時間から2点間の基線長を測定する。

図は測地学テキストのホームページより

(<http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/part2/2-4/2-4-1-2.html>)

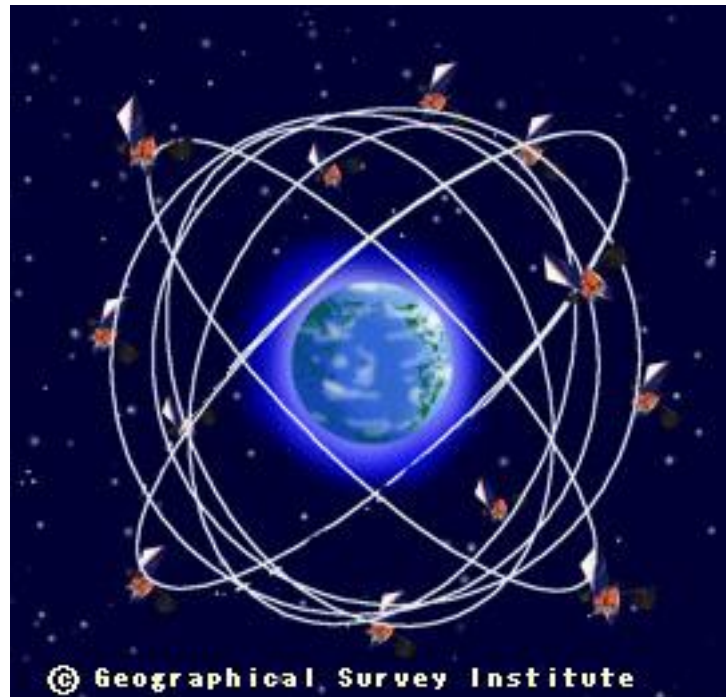


図2 GPS衛星のイメージ図。4個以上の衛星からの距離を測定することにより観測点の位置を決定する。

図は国土地理院のホームページより(<http://terras.gsi.go.jp/gps/gps.html>)

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

合成開口レーダー(SAR)は、アンテナを持った飛行体が動きながら電波を受信することで仮想的にアンテナのサイズを大きくしたレーダーのことである。レーダーにより得られるデータの空間分解能はアンテナのサイズが大きくなるほどよくなるが、衛星上に搭載するアンテナのサイズには限度がある。そこでアンテナ自身が動きながら電波を受信することによりアンテナのサイズを仮想的に大きくすることで特に **azimuth** 方向の空間分解能を高めることが出来るようになる。ここで **azimuth** 方向とは衛星の動く進行方向のことで、もうひとつの **range** 方向とは **azimuth** 方向に直交した方向のことである。(図1)

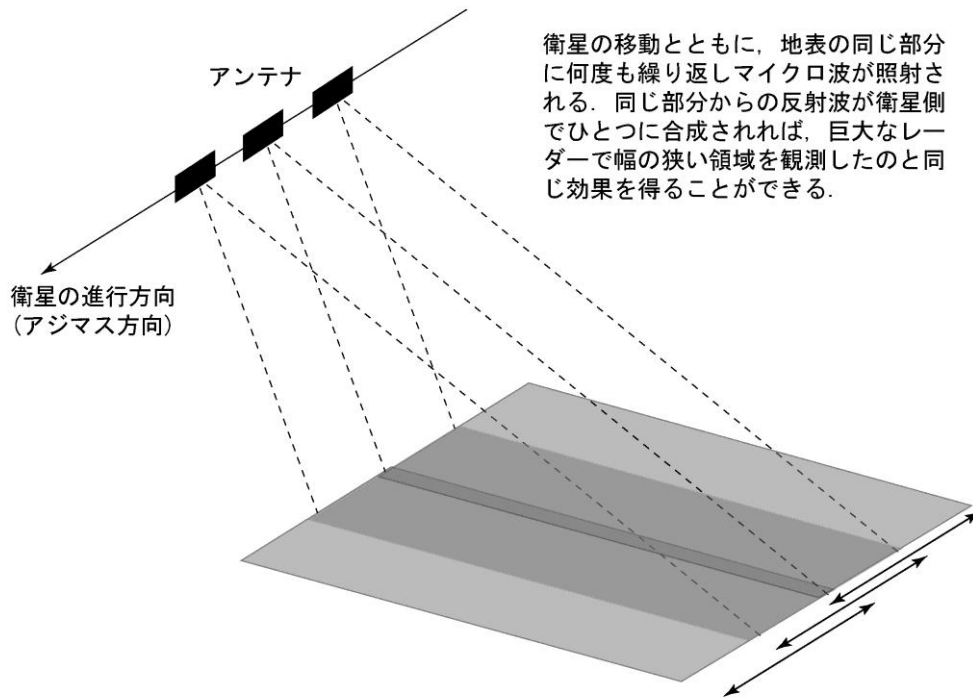


図3 アンテナの合成開口の原理.

図は測地学テキストのホームページより

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/part2/2-4/2-4-1-4.html>

通常のレーダーは電波の波長を λ 、アンテナのサイズを D とするとその角度分解能は λ/D で、距離分解能はターゲットまでの距離を R とすると $R \cdot \lambda/D$ と表現される。つまり衛星の高度が高くなれば高くなるほど距離分解能は悪くなることになる。しかし SAR の場合、azimuth 方向は高度によらないで決まる。これは SAR の特徴のひとつである。

SAR に限らず多くの高分解能レーダーではパルス圧縮が用いられており、SAR も例外ではない。SAR の range 方向の高分解能化はパルス圧縮の手順を経てパルス幅が圧縮され高分解能化が実現されている。衛星から放射する電波の垂直方向からの角度 (offnadir 角) を γ 、パルス波形が周波数領域を持つバンド幅を B_p とすると、

$$\delta R_g = \frac{c}{2B_p \sin \gamma}$$

となる。今回データとして用いる陸域観測技術衛星 ALOS(だいち)に搭載されている SAR センサーの PALSAR の場合、FBS モードならバンド幅 $B_p = 28\text{MHz}$ 、offnadir 角 $\gamma = 30^\circ$ とすると光の速度は $c \approx 3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$ なので、理論上の range 方向空間分解能は、

$$\delta R_g = \frac{3 \times 10^8}{2 \times \frac{1}{2} \times 28 \times 10^6} \approx 10[m]$$

となる。

一方 SAR の azimuth 方向の空間分解能についても range 方向に用いられているパルス圧縮と原理的にはかなり似ている理論を用いて高分解能化を図っている。azimuth 方向の場合ドップラー効果による衛星から送信する電磁波の周波数と反射体から返ってくる電磁波の周波数のズレ(ドップラーシフト)を利用して圧縮処理を行い空間分解能を高めている。もしこの圧縮処理をしないと azimuth 方向の空間分解能は実開口アンテナと変わらない。その場合電波伝搬理論の結果によると電磁波の波長を λ 、アンテナの azimuth 方向の長さを L とするとアンテナからの距離が R の地点での距離分解能は、

$$\delta x = \frac{R\lambda}{L}$$

となり、数 km から数十 km の分解能となってしまう。しかし SAR の場合は結果的には azimuth 方向の空間分解能 δx は、

$$\delta x = \frac{L}{2}$$

となり、高度にも波長にも入射角にもよらずアンテナサイズのみで決まることになる。これは SAR において最も特徴的で有名な結果である。

SAR の受信データから、これら圧縮処理をして最初に得られる画像は強度画像 (SLC 画像, Single Look Complex Image) である。SAR の受信生データは複素数でできており、その実部と虚部から反射強度と位相の情報を得ることが出来る。そのうちで、実部と虚部の二乗和の平方根で求まる反射強度を画像化したのが強度画像である。(図 4)

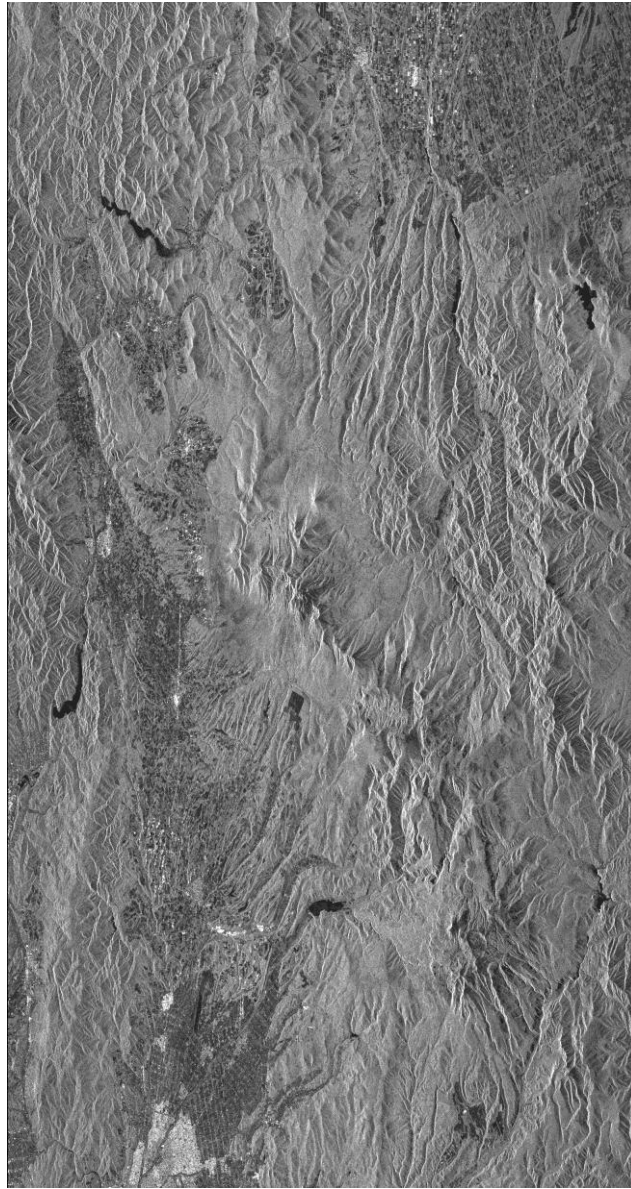


図4 SAR データから得られる強度画像

図4の強度画像は一見単なる白黒写真のように見えるが、この画像のデータはALOSのPALSARのデータで、L-bandのマイクロ波(波長23.5cm)を用いているので昼夜問わず雲や噴煙を透過する全天候型で、さらに地表の植生も透過できるという特徴を持っている。今SARデータから強度画像を作る場合には植生を透過する特性についてはあまりメリットにはならないが、このあと解説する本研究のメインであるInSAR画像の作成時にはこの特性が大きなメリットとなる。

1.3 干渉 SAR(Interferometric SAR, InSAR)

1.2節ではSARについての基本的なことについて触れたが、この節ではSARを応

用した InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar)という方法について説明する。

InSAR は 2 枚の観測時期の異なる SLC 画像の位相の差を取り出して視覚化したもので、その位相差を長さに変換することで衛星視線方向についての地表変位の測定が出来るものである。その原理はヤングの実験と呼ばれる光の干渉性の実験で理解できる。(図 5)位相のそろったコヒーレントな波が 2 つのスリットを通過し、その先の壁にあると 2 つの波の位相差に応じて同位相な部分では強め合って明るくなり逆位相な部分では打ち消しあって暗くなり、壁には干渉縞と呼ばれる縞模様ができる。

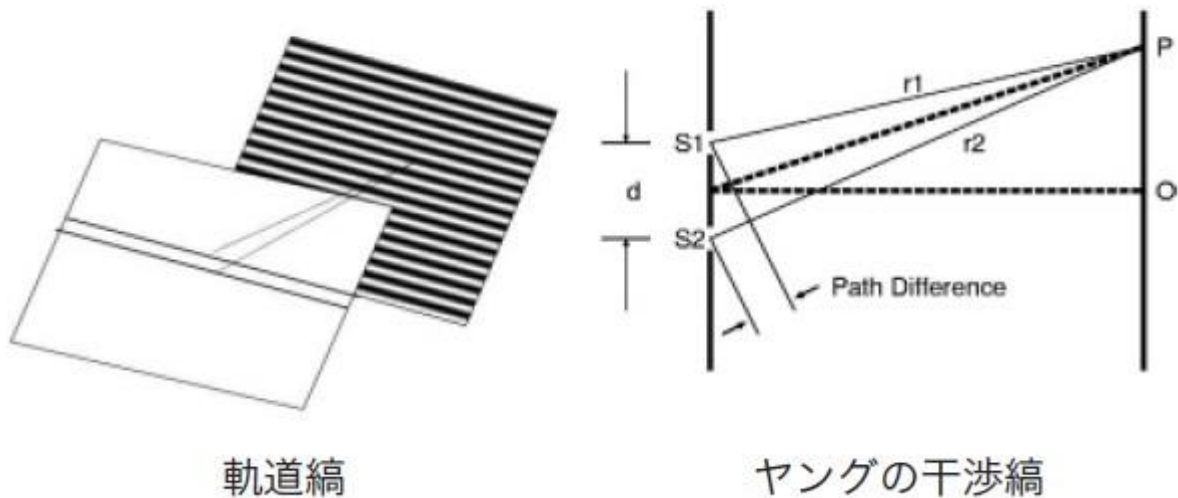


図 5 ヤングの実験の図。図は東京大学地震研究所のホームページより

(<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/NEWSLETTER/200701/nl200701.html>)

InSAR においてもこれと全く同じ干渉縞が得られる。InSAR の場合は明暗の縞模様ではなく周期的に変化する位相の縞模様で表現される。

2 枚の SLC 画像を干渉させる場合まず最初に 2 枚の画像の位置合わせ(画像マッチング)をする必要がある。それは 2 枚の画像が基本的に同じ領域を観測しているとはいえピクセルレベルで完全に一致しているわけではないため、位置合わせをほかにしないと干渉画像そのものを得ることが出来ないことになる。

位置合わせが出来ると最初の干渉画像ができる。この初期干渉画像には 2 回の観測の間の軌道の違いから生じる軌道縞と地形の起伏に起因する地形縞、そして 2 回の観測の間に起こった地殻変動による変動縞が含まれている。(図 6)

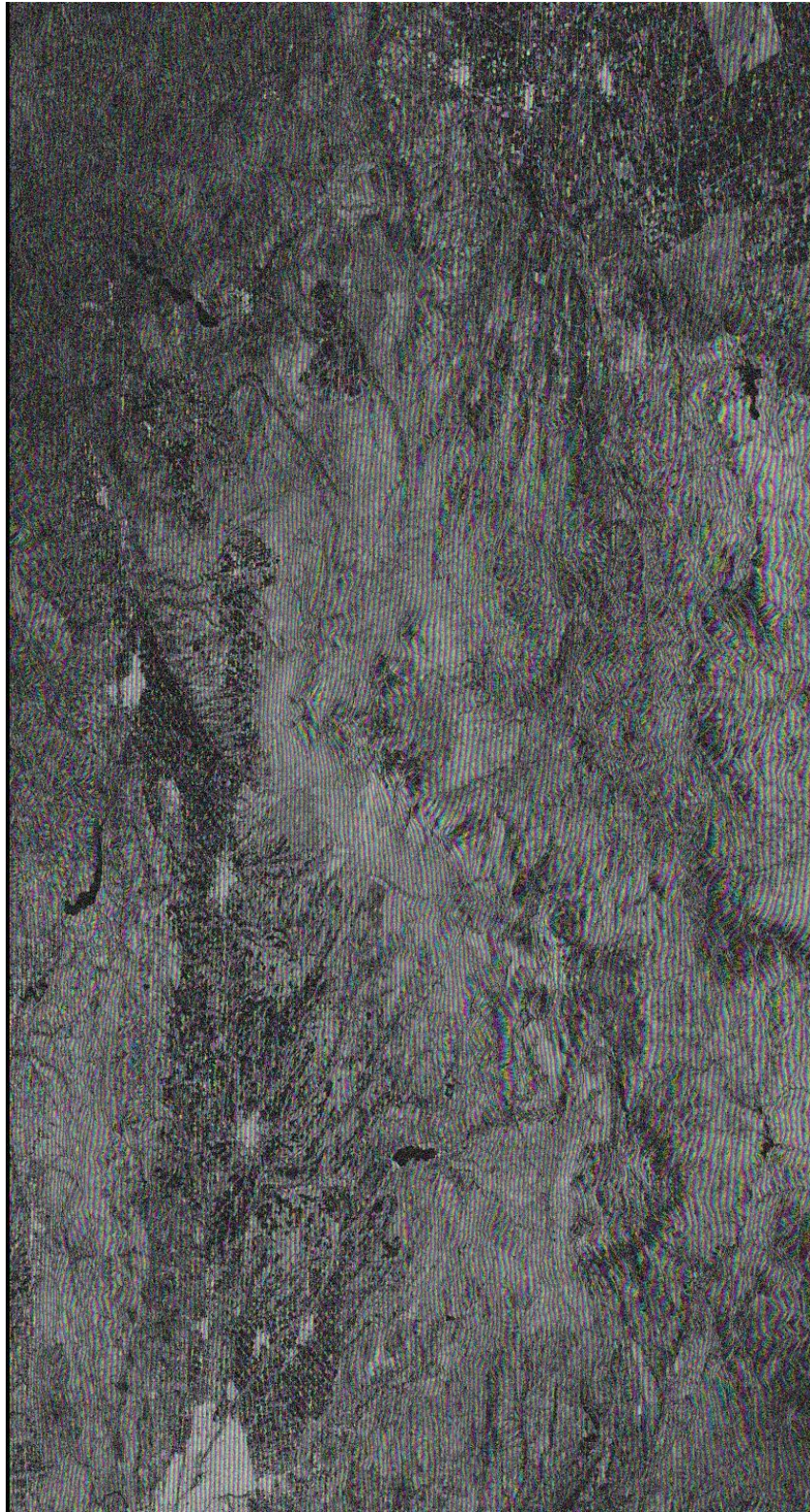


図6 初期干渉画像. 基線長は 479m. 干渉による縞模様と強度画像を重ねて表示してある.

軌道縞は先に説明したヤングの実験のスリットと同じものでこれは衛星軌道データから計算して取り除くことが出来る. このとき2つの衛星の間の基線長は短ければ短い程よく, 逆にあまりに長くなると干渉画像を作ることが出来なくなることもある. 衛星軌道データから軌道縞を推定することにより初期干渉画像から軌道縞を除いた

干渉画像を得ることが出来る。(図 7)

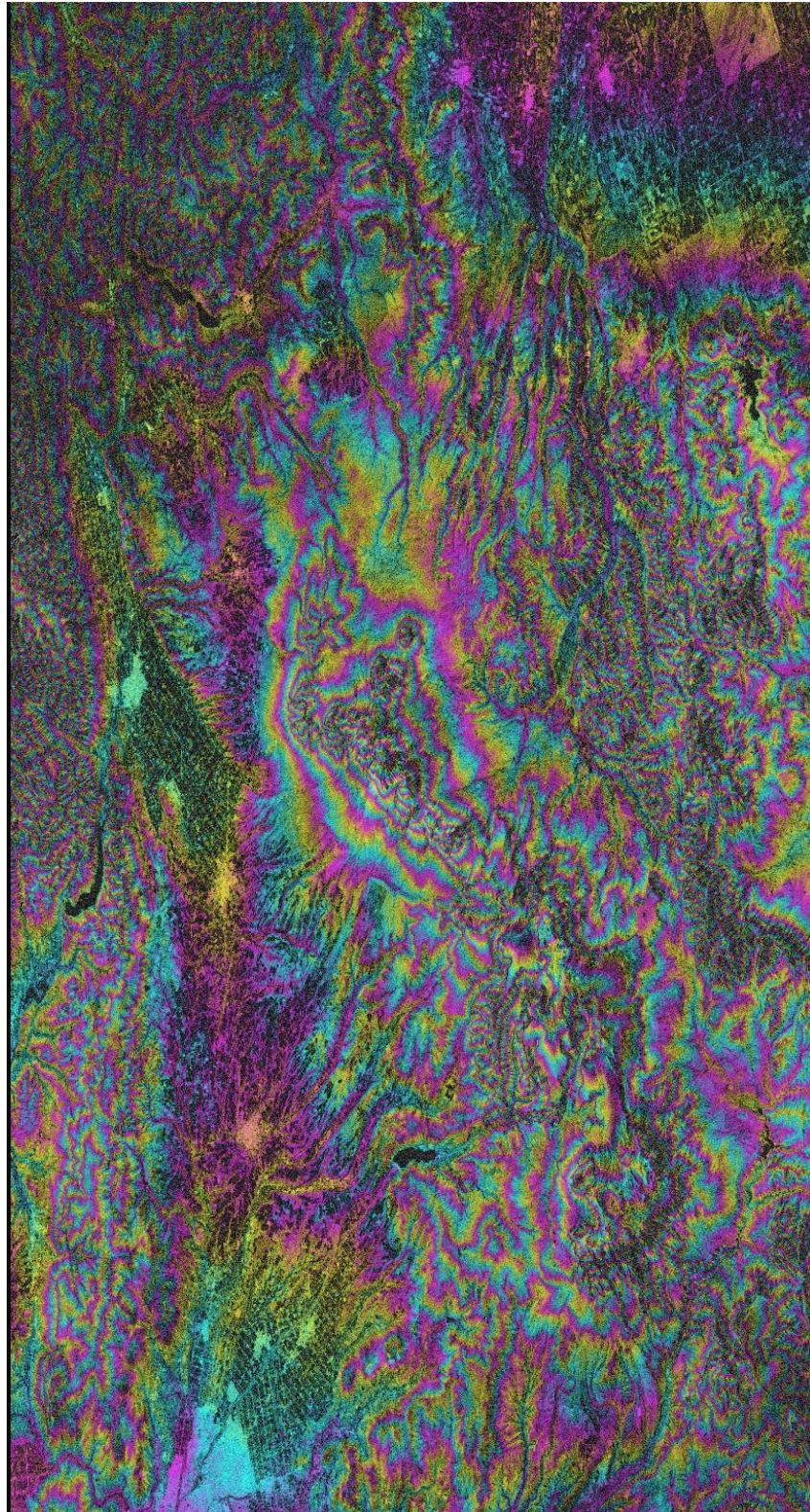


図 7 初期干渉画像(図 6)から軌道縞を取り除いた干渉画像.
縞模様と重ねて強度画像も表示してある.

次にこの干渉画像から地形縞を取り除くことになる。地形縞を取り除く場合について

は高分解能な数値地図(Digital Elevation Model, DEM)を利用して地形縞を取り除くことになる。日本では国土地理院の50mメッシュ数値標高がある。現在一部の火山では10mメッシュのDEMもあるがそうでない地域は50mメッシュ数値標高を用いる。海外では北緯南緯60°以内なら Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)による約90mメッシュのDEMがあり, 2003年から利用できるようになっている。DEMに基づいて地形縞をシミュレートして干渉画像との差を取れば干渉画像に残るのは基本的には変動縞のみと言うことになる。(図8)

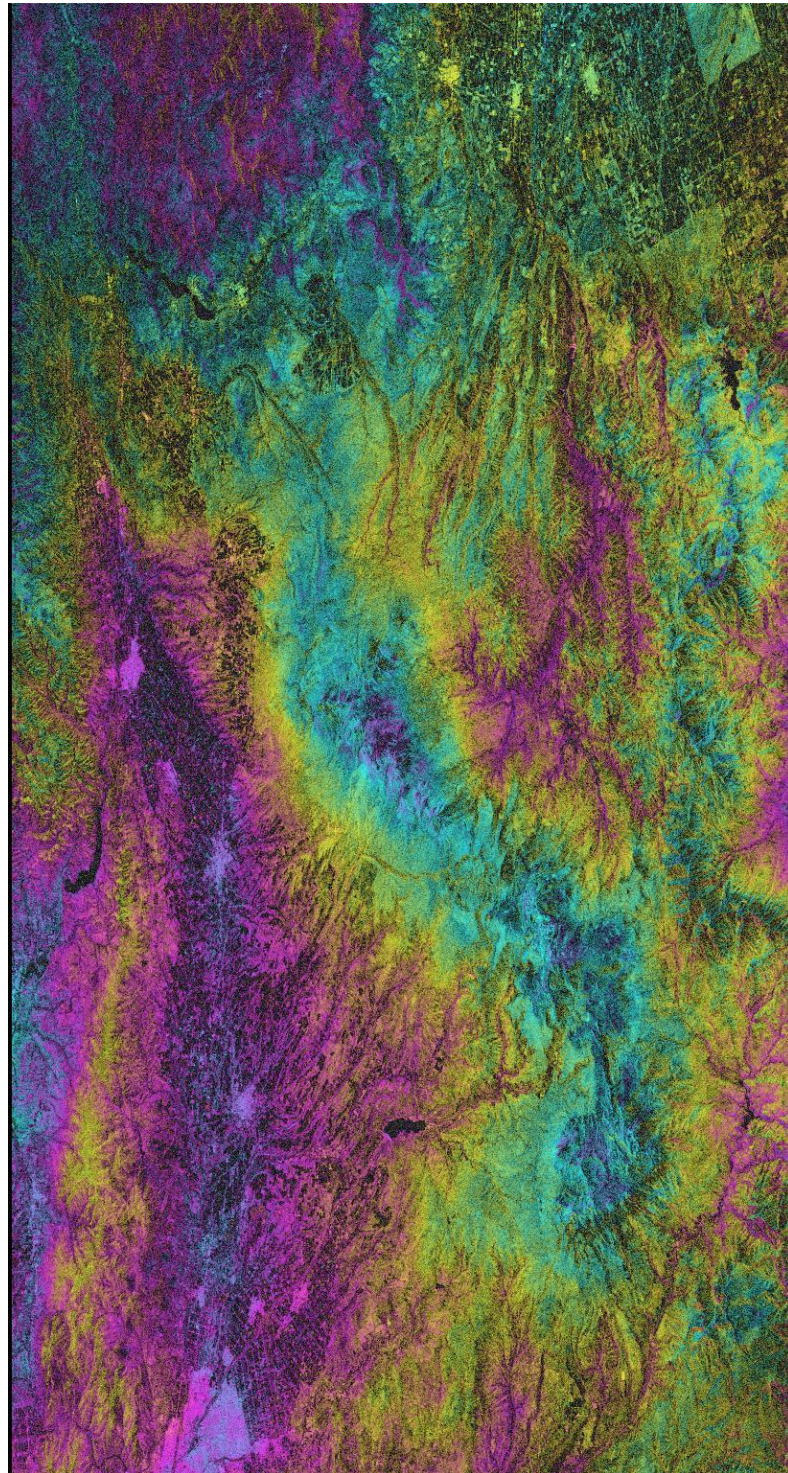
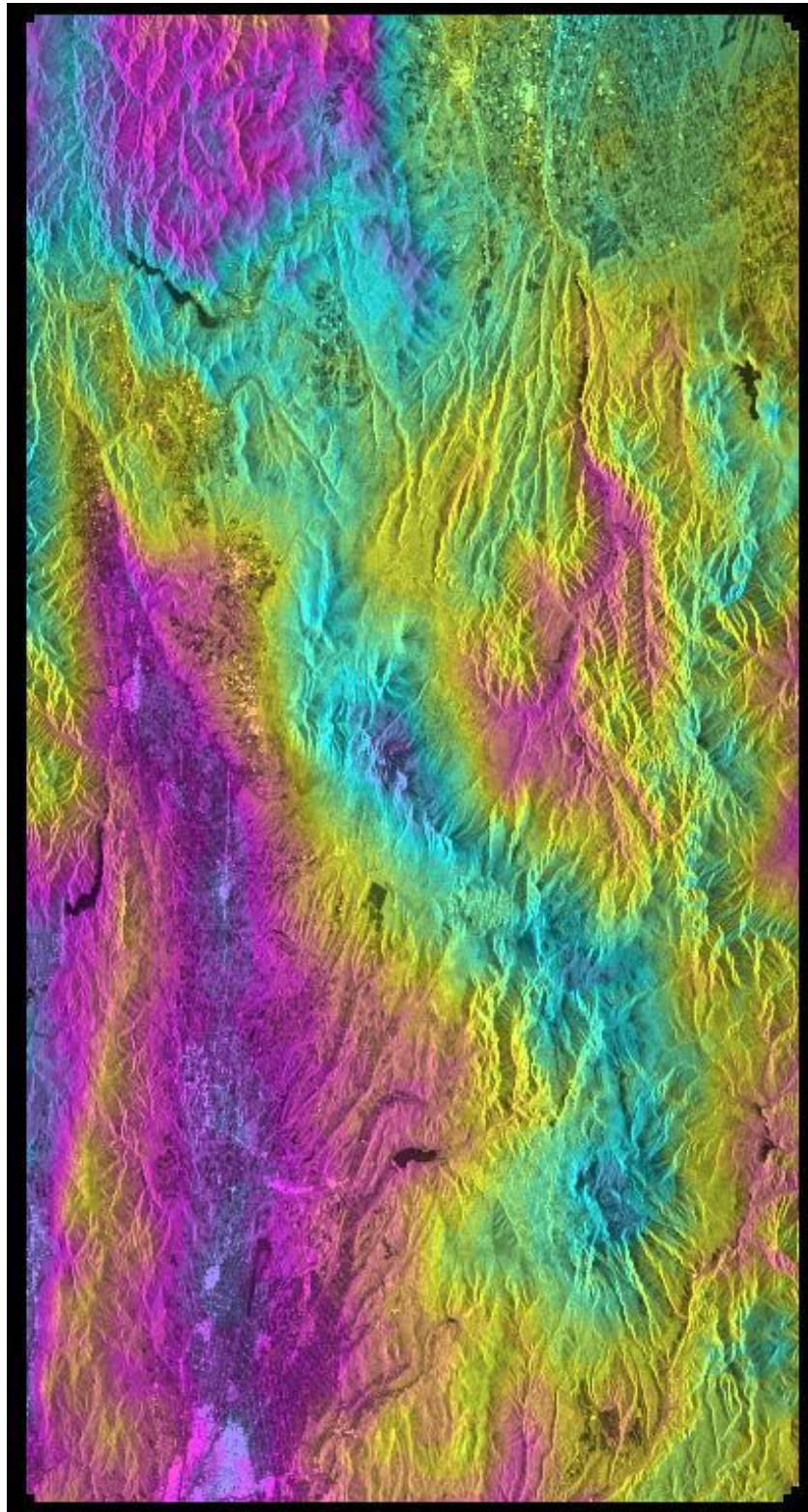


図8 図7からDEMにより推定した地形縞を取り除いた干渉画像

しかし実際にはまだすべき作業が残っている。1 つ目は衛星軌道データの不正確さによる長周期の干渉縞が残ってしまうことがあることである。その際には軌道情報の再推定が必要になる。2 つ目はこの段階では干渉画像の位相データには 2π の任意性が残っているため視線方向の距離の変化に直すことが出来ないということである。そのため位相アンラッピング(**phase unwrapping**)と呼ばれる 2π の任意性を取り除く作業をしなければならない。3 つ目は SAR の観測データはレンジアジマス座標のまま視覚的にわかりにくいため普段見慣れている UTM 座標に変換するということである。この作業はジオコーディングと呼ばれレンジアジマス座標と UTM 座標とを対応づける作業である。

ひとまず初期干渉画像から軌道縞と地形縞を取り除くことができたなら次に行うのは干渉画像の位相アンラッピングをして 2π の任意性を取り除くことである。しかし図 8 の段階では画像の分解能が高すぎてノイズが多く見られるため先に分解能を落とすことから始める。本研究では位相アンラッピングをする際には干渉画像の分解能を $1/4$ にしてアンラッピングを行った。分解能を落として位相アンラッピングを行うと次のような干渉画像が得られる(図 9)。これが初期基線長データに基づいた差分干渉 SAR 画像となり、この図を基に地殻変動を探ることになる。



$-\pi$ ← | → $+\pi$

図9 図8を位相アンラッピングした干渉画像。スケールは青を0とし $-\pi$ で衛星視線方向に5.6cm 近づく変位で、 $+\pi$ で5.6cm 遠ざかる変位になる。

図 9 では全体的に地殻変動というよりも地形に 관련된位相の変化が見えているが、これは地形効果による大気状態の変化を補正しきれずに残ったノイズによるものが大きい。これは地形相関大気ノイズをモデリングし補正することである程度良くなる場合もある。

図 9 までのプロセスで地殻変動を検出するための干渉画像を作るところまでは終わったが、このままではレンジアジマス座標のままのため地図上の位置や方位がわかりにくい。そのため干渉画像が完成したら次は干渉画像のレンジアジマス座標を普段見慣れている UTM 座標に変換する。UTM 座標に変換した干渉画像は図 10 のようになる。

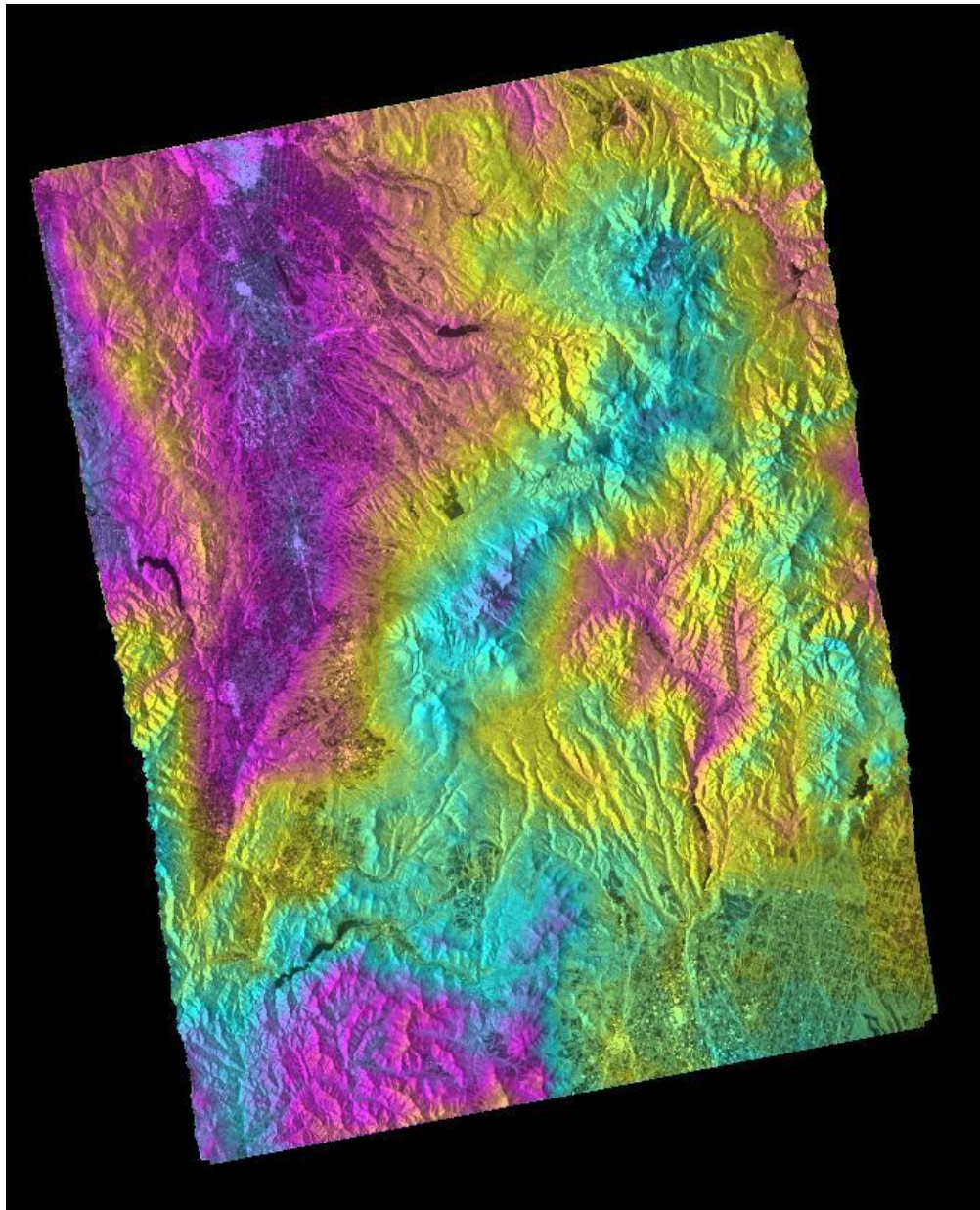


図 10 UTM 座標に変換した干渉画像

図 10 の干渉画像が斜めになっているのは観測する衛星の軌道が南北方向に対して傾いているためである。

こうして2つの SAR データから位相の差を取り出した干渉 SAR 画像を作ることができる。実際の検出の際には様々な補正を試みて地殻変動を探していくことになる。

1.4 十勝岳と火山性地殻変動

十勝岳は北海道の上川管内の美瑛町，上富良野町，十勝管内の新得町の3つの町の境に位置する標高 2077m の活火山で十勝岳連峰の主峰である。その緯度経度は世界測地系で北緯 43 度 25 分 05 秒東経 142 度 41 分 11 秒で，北海道のほぼ真ん中である(図 11)。平成 20 年 12 月 16 日に噴火警戒レベルが導入され，現在は噴火警戒レベル 1(平穏)となっている。

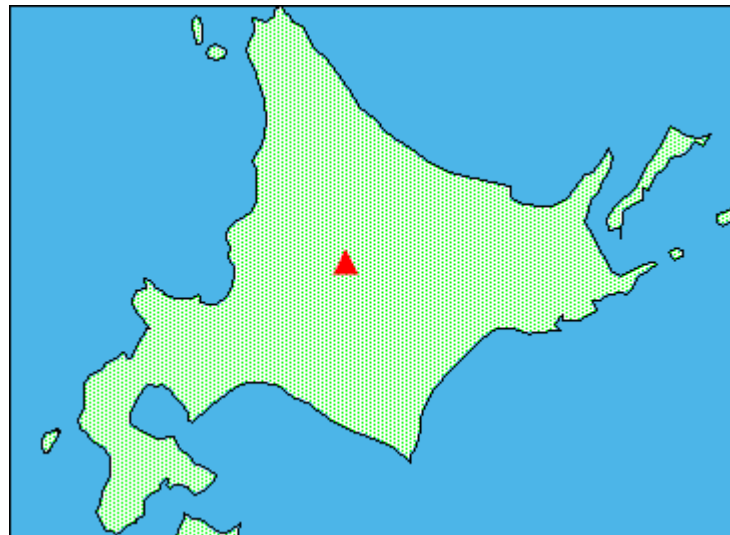


図 11 十勝岳の位置。図は気象庁のホームページより

(http://www.seisvol.kishou.go.jp/sapporo/108_Tokachi/108_Tokachi.htm)

気象庁によると十勝岳は 3000 年前以前は火山活動は低調だったが約 3000 年前から活動期に入り，その頃の活動が最大規模で山体崩壊とともに爆発的噴火が繰り返され，その際に火砕流も発生し，グラウンド火口が形成された。その後，約 1000 年前グラウンド火口の北西でサブプリニー式噴火が繰り返され複数の火砕丘が形成された。約 500 年前頃からは中央火口丘の活動となり火砕丘を形成し溶岩も流出した。19 世紀になっても中央火口丘は小規模な活動を続けており，20 世紀からは噴火活動が活発になってきた。20 世紀には頻繁に小噴火が起り，1962 年(昭和 37 年)の 6 月末には中央火口丘南側湯沼付近から噴煙高度 12000km に達する大規模な噴火が起り，火山弾や火山灰を大量に噴出した。このときの爆発音は 190km に達し，その噴出量は $7.1 \times 10^7 m^3$ であった。この噴火によりグラウンド火口南西壁沿いに 62-0, 62-1, 62

ー2, 62-3 火口を形成し 62-2 火口のまわりにスコリア丘を形成した. その後も 1985 年(昭和 60 年)に 62-1 火口から小噴火, 1988 年(昭和 63 年)に 62-2 火口から噴火, 2004 年(平成 16 年)にも 62-2 火口からごく小規模な噴火が起こっている. 十勝岳付近の観測点は図 12 のようになっている.

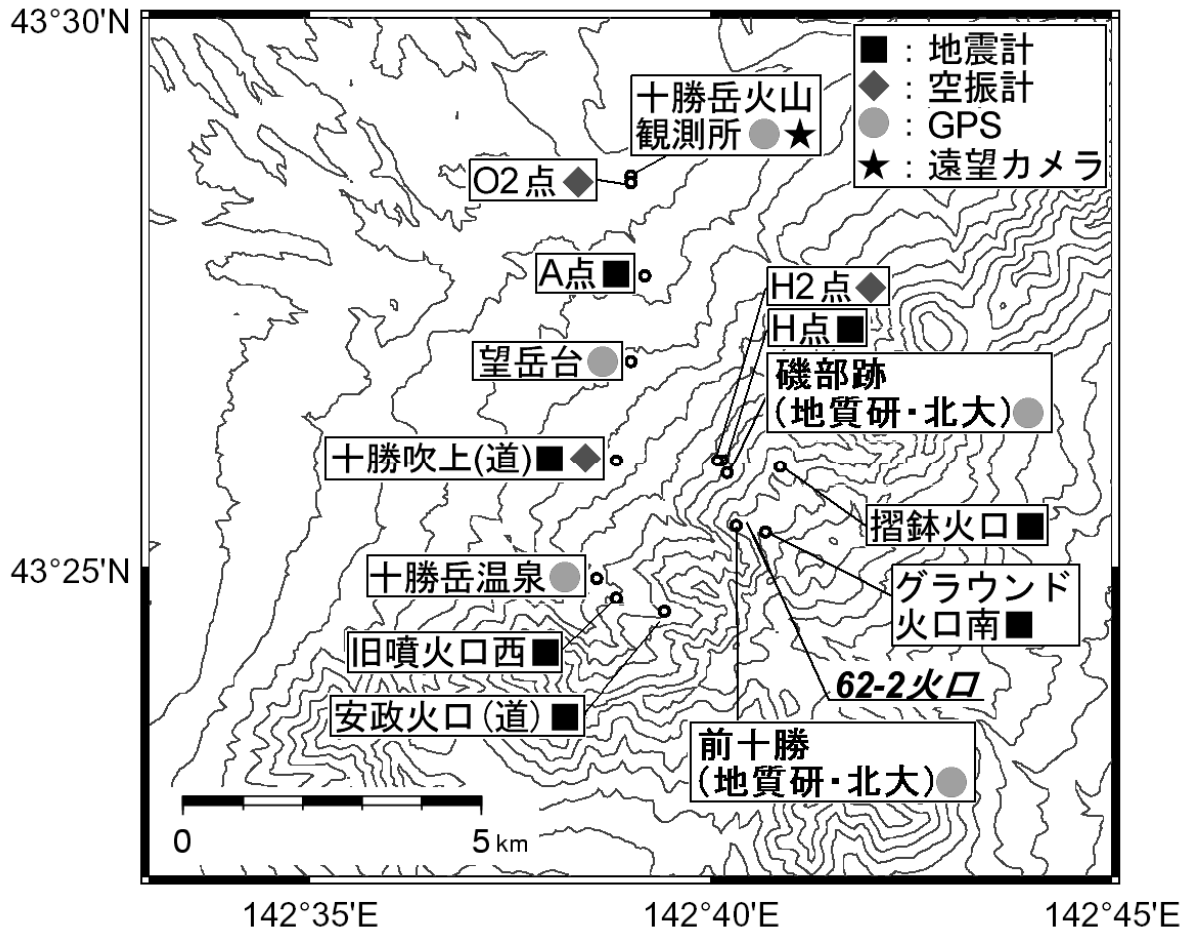


図 12 十勝岳周辺の観測点の位置. 図は気象庁のホームページより

(http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/08m12/108_08m12.pdf)

1962 年の噴火の際に形成された火口のうち 62-2 火口は中央火口丘と同じ程度の大きさのスコリア丘を形成し, 現在も噴気の噴出が見られる. 札幌管区気象台の火山監視・情報センターの十勝岳の火山活動解説資料によると 2006 年 9 月から 2008 年 12 月現在まで GPS 連続観測の結果 62-2 火口付近浅部の膨張を示すと考えられる基線長の伸びが認められ, GPS 間の基線長の推移は図 13 のようになっている. 図 14 は GPS 観測点の位置である.

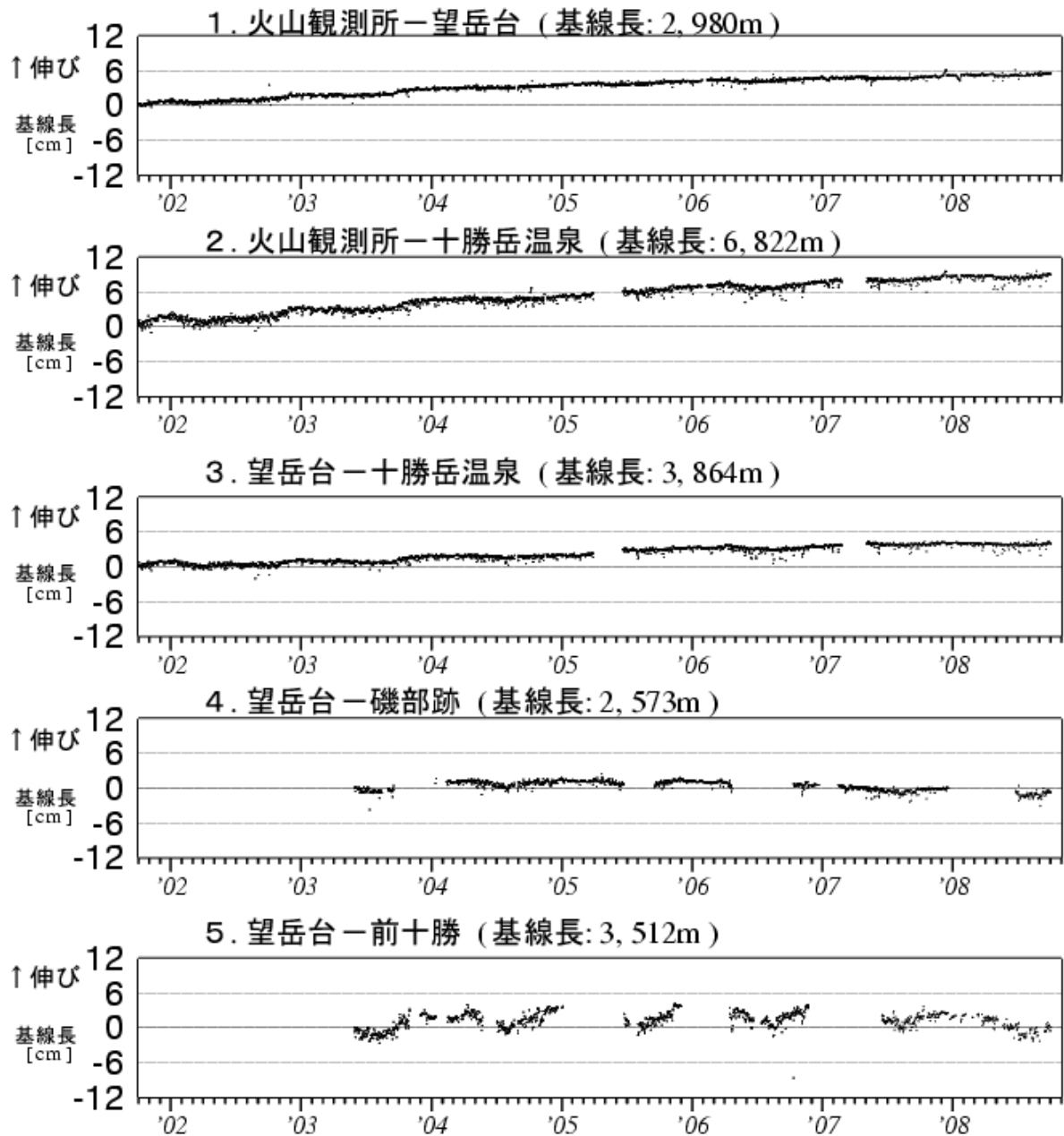


図 13 十勝岳の GPS 連続観測による基線長の変化. 図は気象庁のホームページより
http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/08m09/108_08m09.pdf

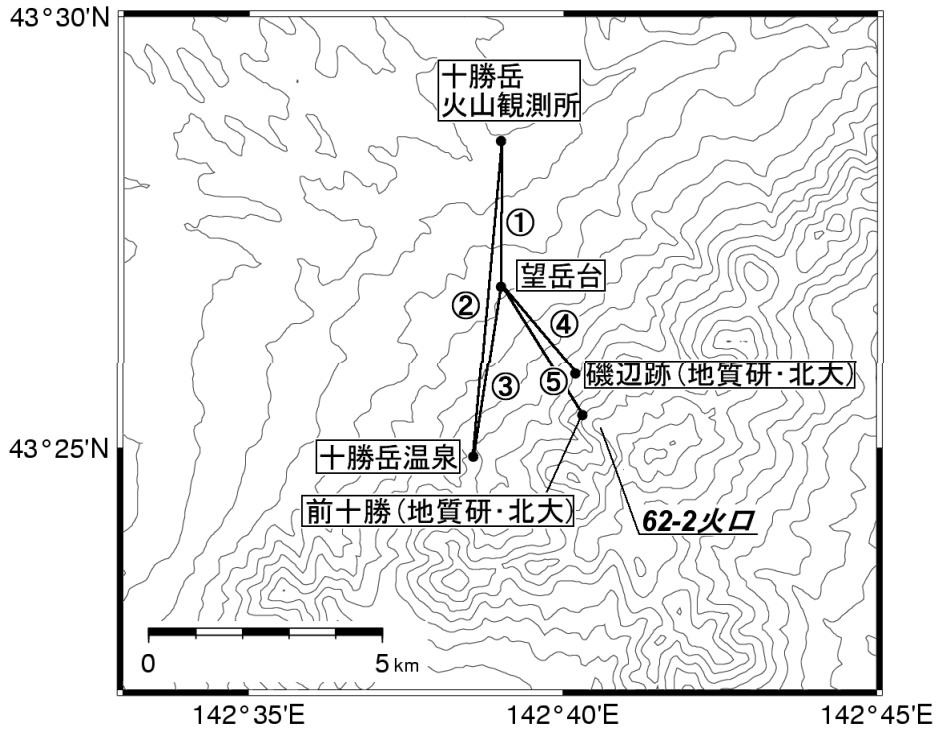


図 14 十勝岳の GPS 観測点の位置. 図は気象庁のホームページより

(http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/08m09/108_08m09.pdf)

図 13, 図 14 によると①, ②, ③の基線長で伸びが観測されている. 62-2 火口からほぼ直線上にある④, ⑤の基線長では伸びは見られない. また, 62-2 火口付近では別の GPS による繰り返し観測が行われており, その観測結果と GPS 観測点の位置は図 15 と図 16 に示す.

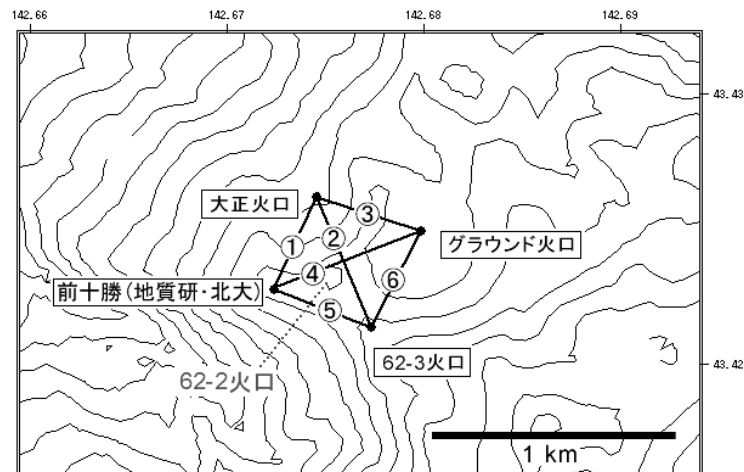


図 15 62-2 火口付近の GPS 繰り返し観測の観測点の位置. 図は気象庁のホームページより

(http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/08m09/108_08m09.pdf)

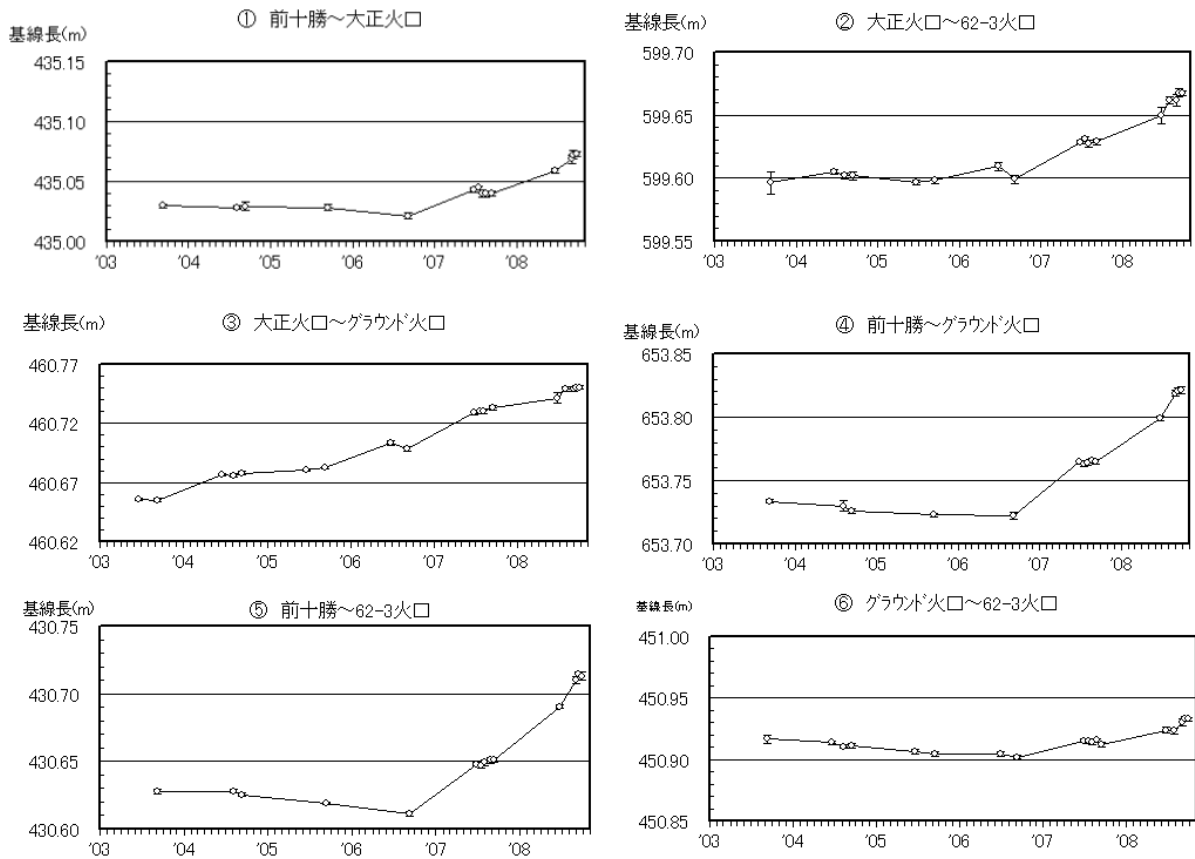


図 16 62-2 火口付近の GPS 繰り返し観測による基線長の変化.

図は気象庁のホームページより

(http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sapporo/08m09/108_08m09.pdf)

図 16 の示すように 2006 年 9 月頃から 62-2 火口付近での膨張を示すような基線長の伸びが認められる。

最近では火山性地震の発生は 1 日あたり 8 回以下で、地震活動も低調に経過しており特に噴火の前兆を示すようなものはないが、今後の火山活動の推移に注意が必要な火山である。

1.5 本研究の目的

これまでで述べてきたように、十勝岳は現在も活動が活発な火山の1つであり、2006年9月からは62-2火口付近での膨張が観測されている。しかし火口付近は今も噴気が噴出するなど人が立ち入るのには危険な場所であり、周囲に設置されたGPSによる観測もその数が多いとは言えず、しかもGPSの場合受信機間の基線長の長さの変化に限られた観測となり具体的にどのぐらいのスケールで地殻変動が起きているのかわかりにくいというデメリットがある。そこで本研究では時間的な分解能はGPSに劣るものの現地に直接立ち入ったり観測点を設置しに行くことなく高い分解能で地殻変動を面的に検出することが可能なInSARを用いて十勝岳周辺の地殻変動を検出する。また、地殻変動のシグナルの見られる所では茂木モデル(1958)を用いて地下に点圧力源があると仮定してその圧力源の深さと規模を推定する。

2 十勝岳周辺の InSAR による解析

2.1 解析を行う領域

本研究では十勝岳の周辺を対象に地殻変動の検出をする。SAR の観測では衛星の軌道と観測する区域に応じたパス(Path)とフレーム(Frame)というのがある。また、SAR センサーを搭載した ALOS は極軌道衛星のため南から北に向かう軌道の ascending と逆に北から南へ向かう descending の 2つの軌道があり、この ascending と descending の違いでも Path は異なる。ALOS の軌道は太陽同期準回帰軌道で傾斜角は 98.16° となっている。そのため図 10 のように UTM 座標に変換した InSAR 画像は斜めになる。Ascending の Path-Frame は 397-860, descending の Path-Frame は 56-2740 で、下の図 17 の範囲になる。

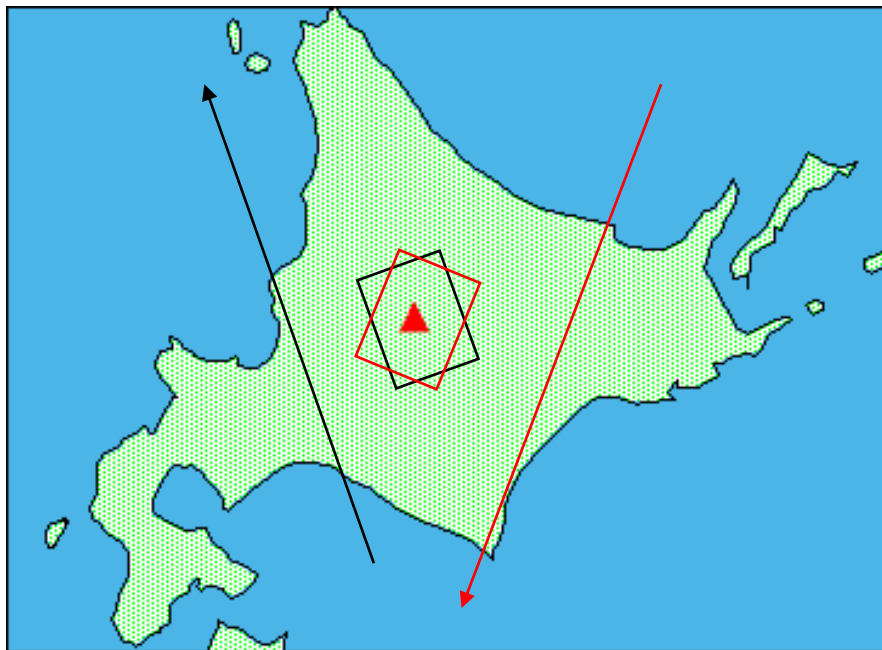


図 17 ascending と descending の方向と観測範囲.

黒が ascending で赤が descending.

図は図 11 を引用

また、SAR は原理的に衛星の真下は観測できないためレーダーを進行方向に対して左右どちらかに傾けて観測する。ALOS の PALSAR は進行方向に対して右側にセンサーを傾けて観測している。

2.2 ascending の解析

まず最初は ascending 軌道(Path-Frame : 397-860)の観測データから得られた干渉画像である. 今回の研究で使用した SAR データは 2007 年 6 月から 2008 年 6 月末までの期間のものである. ただ, 干渉させる 2 つのデータの衛星の基線長が長すぎたり地表に積雪があったりするとうまく干渉しない場合もある. この場合の基線長とは衛星視線方向に垂直な成分のことで, 以後基線長と表記する場合は基線長の垂直成分のことを指す. それぞれのデータのペアで, 干渉できたかどうかを下の表 18 に示す.

	20070628	20070813	20070928	20071229	20080213	20080330	20080515	20080630
20070628		○	○	×	×	×	×	○
20070813			○	×	×	×	×	×
20070928				×	×	×	×	○
20071229					△	×	×	×
20080213						×	×	×
20080330							×	×
20080515								×
20080630								

表 18 ascending の干渉表

表 18 の三角になっているペア(20071229-20080213)は, 基線長が長くないにもかかわらず一部の領域で干渉できておらず, 積雪の影響と思われる.

以下に干渉がうまくできたペア(表中の○のペア)と三角のペアの干渉画像を載せる. 図の干渉縞のスケールは図 19 のようになり, 青から赤に変化すると $+\pi$ 位相が増えており, マイクロ波はレーダーから地表まで往復しているため衛星の視線方向からレーダーの波長 $23.5\text{cm}(=2\pi)$ の $\frac{1}{4}$ の 5.9cm だけ遠ざかっている. 逆に青から黄色に変化すると $-\pi$ 位相が変化しており, 衛星の視線方向に 5.9cm だけ近づいていることになる. 青~赤~黄~青と変化すると位相は $+2\pi$, 青~黄~赤~青と変化すると位相は -2π 変化している.

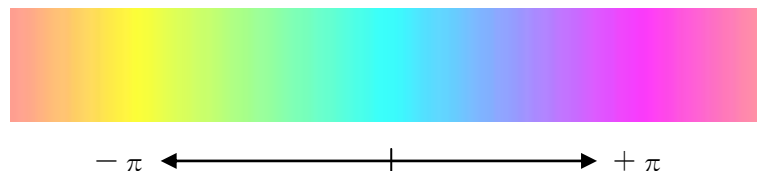


図 19 干渉縞の scale bar

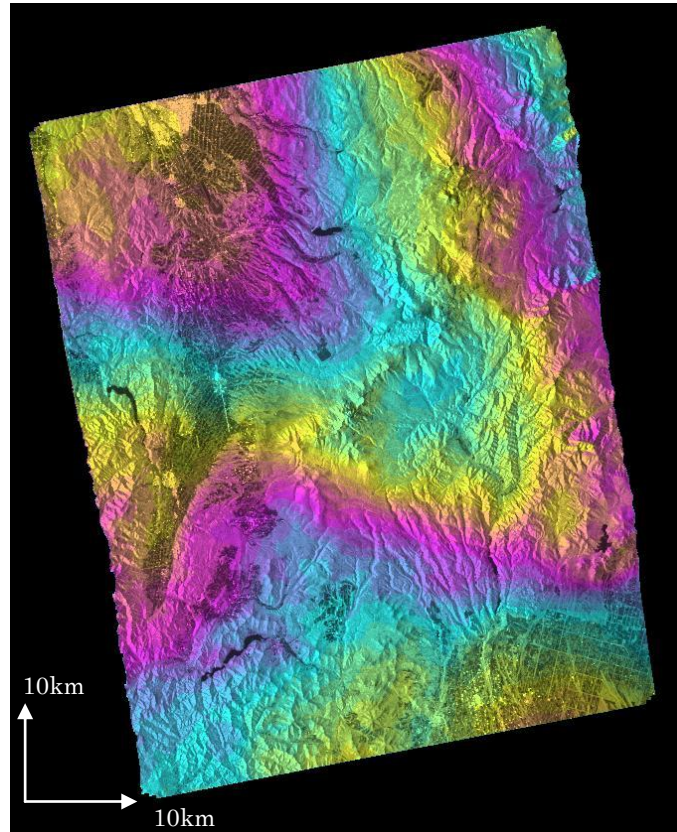


図 20 20070628-20070813 の干渉画像. 基線長は 253m

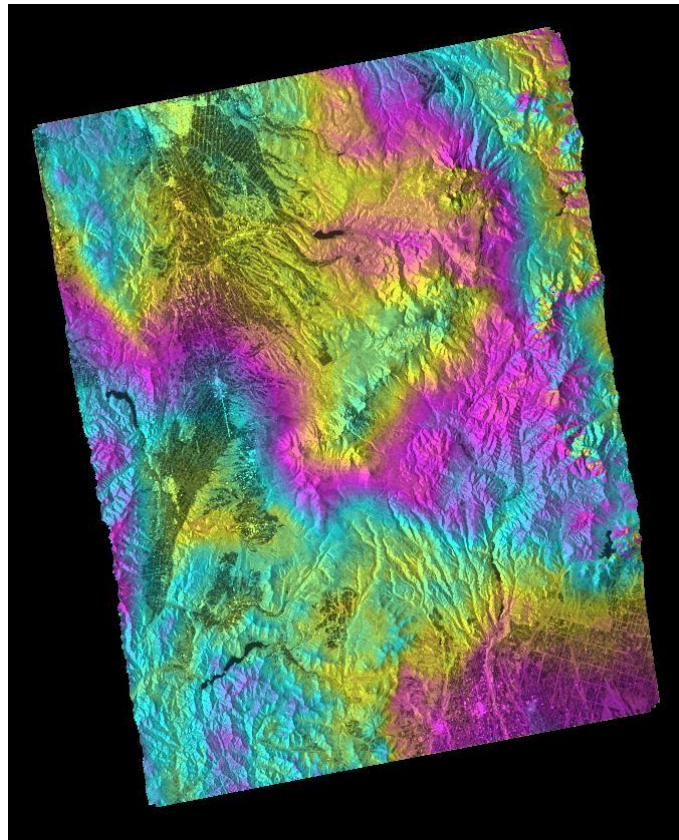


図 21 20070628-20070928 の干渉画像. 基線長は 535m

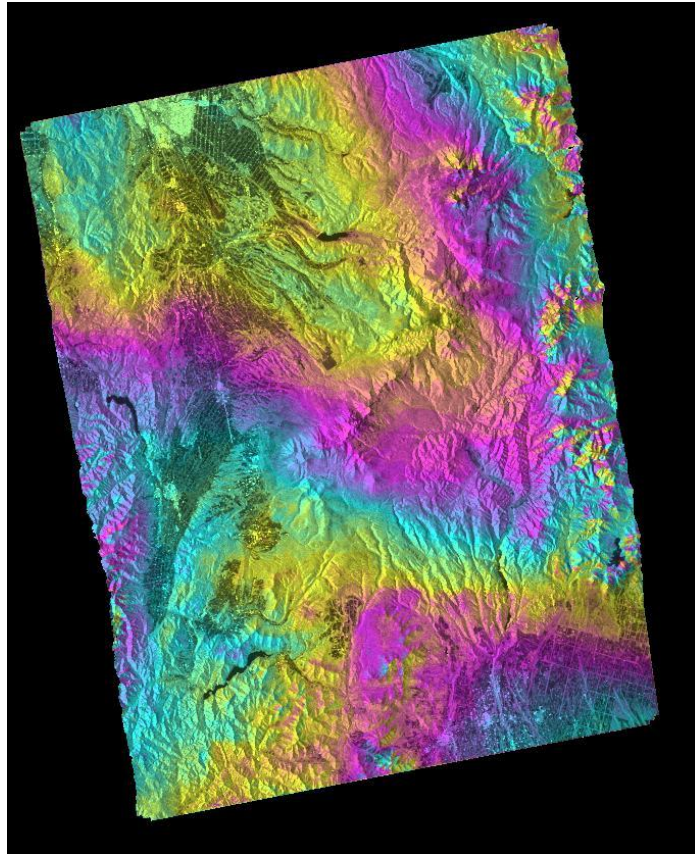


図 22 20070628-20080630 の干渉画像. 基線長は 837m

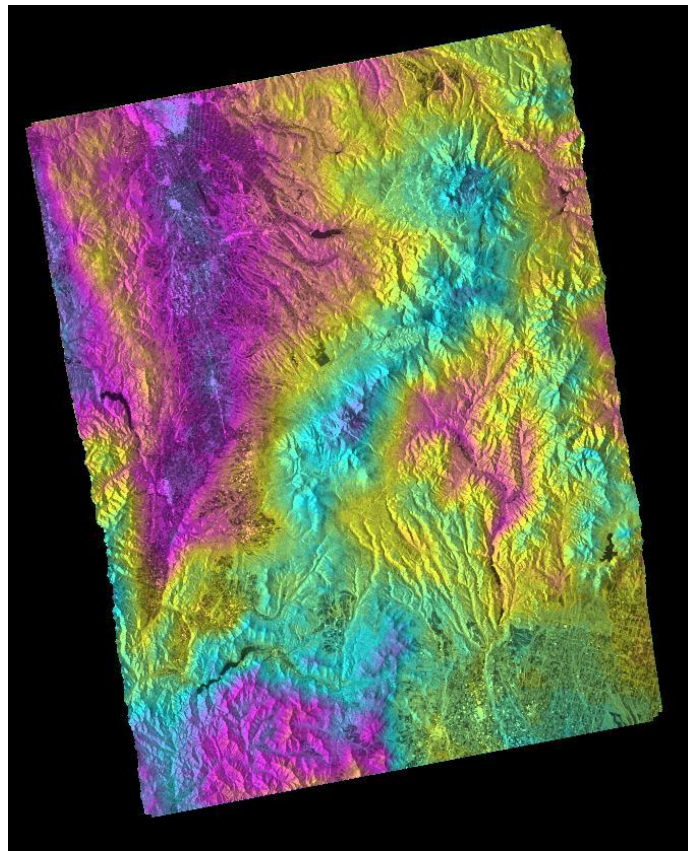


図 23 20070813-20070928 の干渉画像. 基線長は 281m

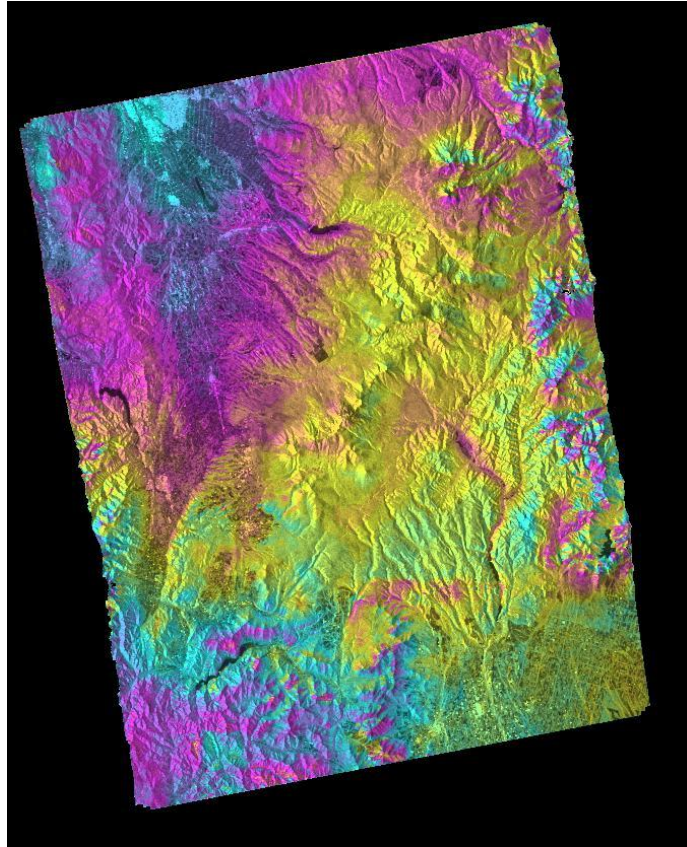


図 24 20070813-20080630 の干渉画像. 基線長は 1090m

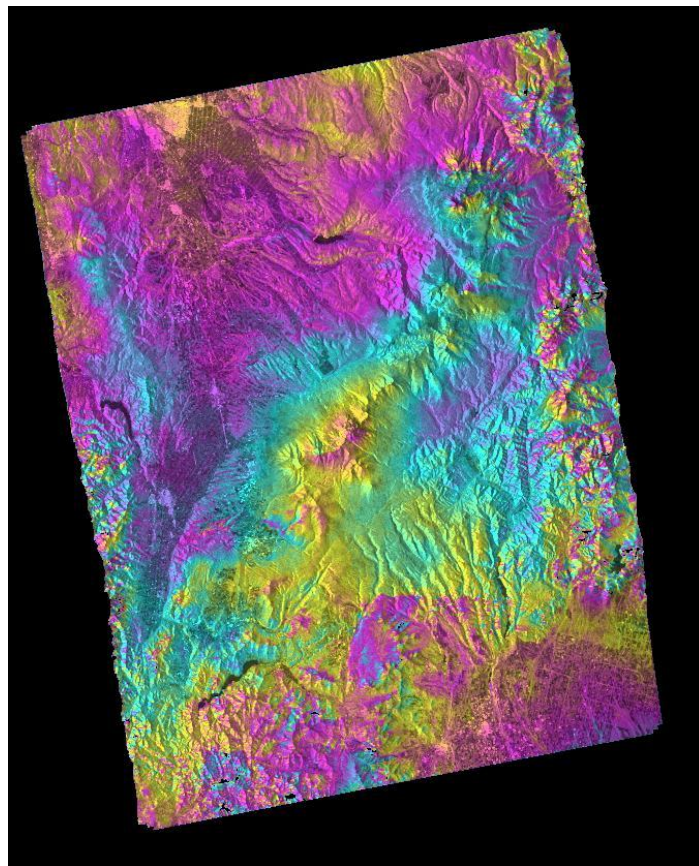


図 25 20070928-20080630 の干渉画像. 基線長は 1372m

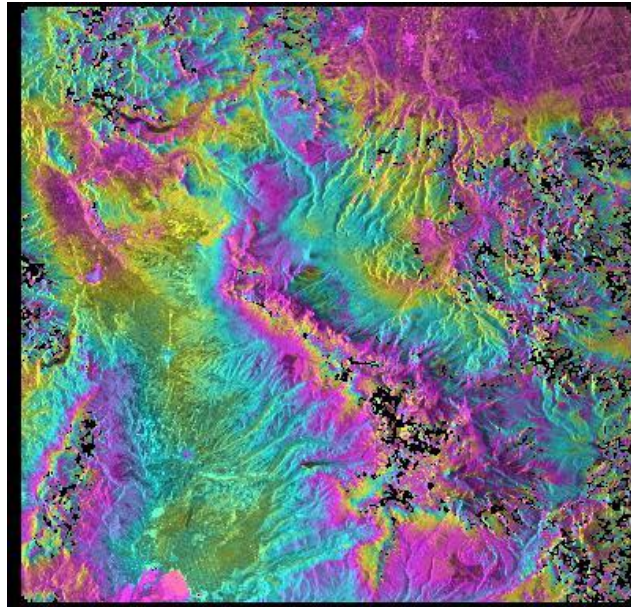


図 26 20071229-20080213 の干渉画像. 基線長は 1053m
 この画像は UTM 変換していない.
 図中の黒い部分は干渉がうまくいかなかった部分.

2.3 descending の解析

次に descending 軌道(Path-Frame : 56-2740)の観測データから得られた干渉画像を載せる. 始めに 2.2 節と同じようにそれぞれのデータで干渉画像ができたかの表を下の表に示す.(表 27)

	20060924	20061225	20070512	20070812	20070927	20071112	20071228	20080329	20080514	20080629	20080814
20060924		x	△	△	x	x	x	x	x	○	◎
20061225			△	x	x	x	x	x	x	x	x
20070512				△	△	x	x	x	x	△	x
20070812					x	x	x	x	x	○	△
20070927						○	x	x	x	x	x
20071112							x	x	x	x	x
20071228								△	x	x	x
20080329									x	x	x
20080514										x	x
20080629											○
20080814											

表 27 descending の干渉表

次に表中の丸で示されたペアの干渉画像を載せる. また, 二重丸になっているペアは十勝岳の火口付近に地殻変動らしきシグナルがでているので, 地形相関大気ノイズモデルを引いたり長周期のトレンドを引いたり補正をかけてよりシグナルを見やすくできるようにした. 表 27 の三角のペアは十勝岳の近辺で干渉がうまくいってなかったので本文には掲載しない.

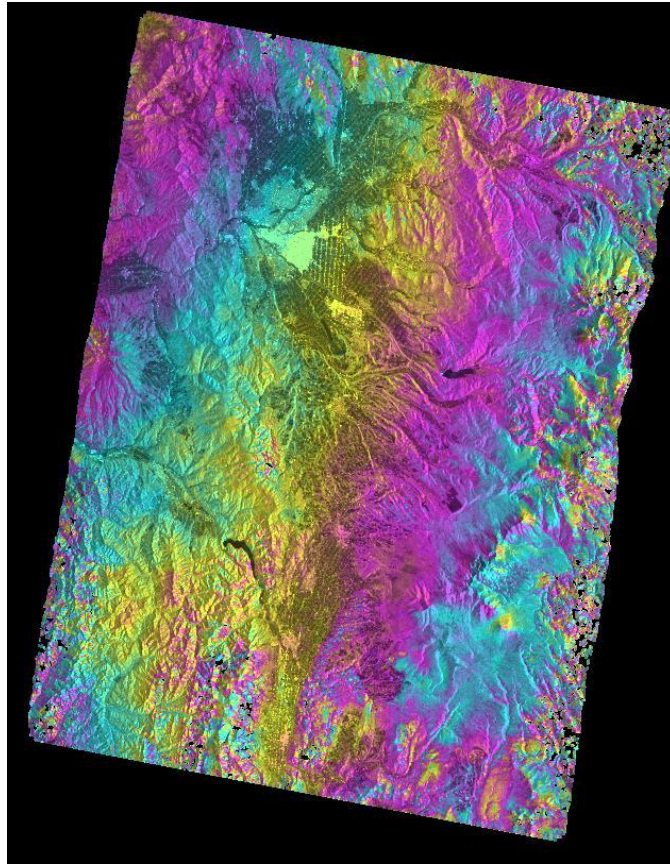


図 28 20060924-20080629 の干渉画像. 基線長は 1504m

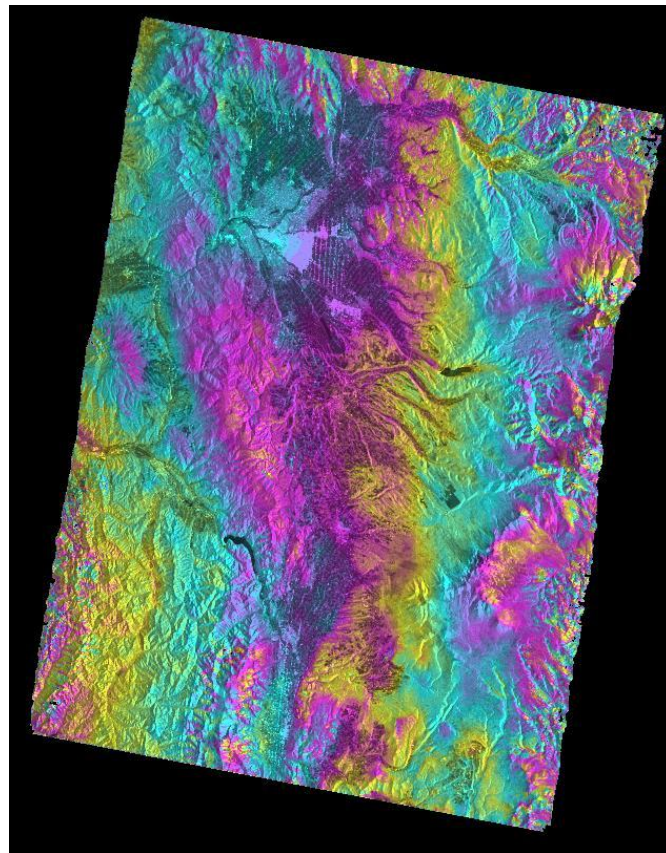


図 29 20070812-20080629 の干渉画像. 基線長は 1193m

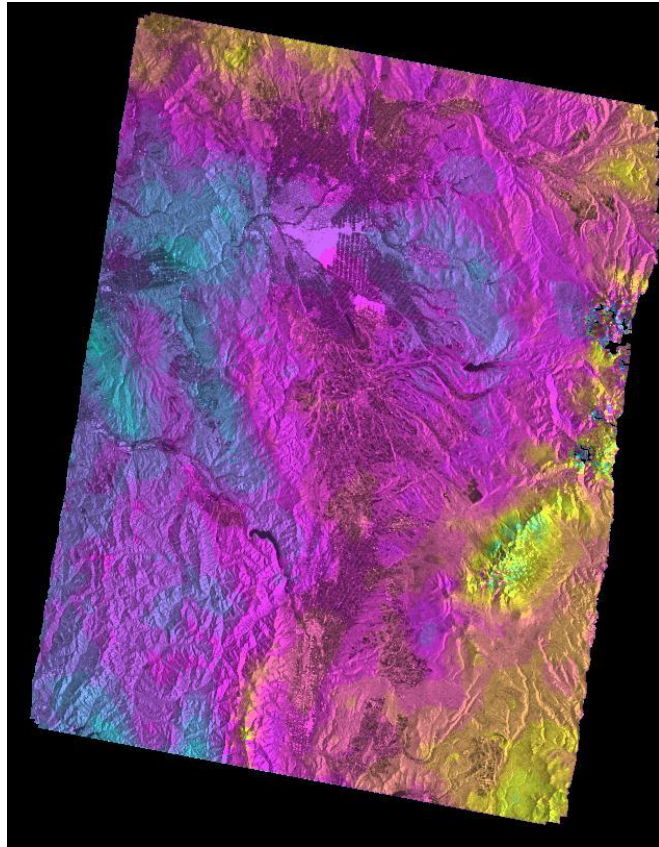


図 30 20070927-20071112 の干渉画像. 基線長は 82m

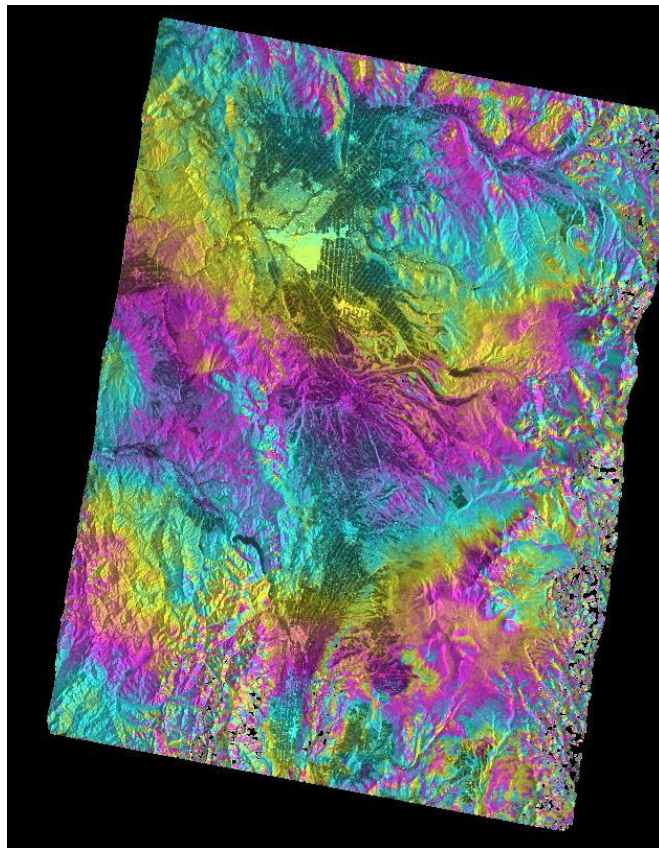


図 31 20080629-20080814 の干渉画像. 基線長は 1955m

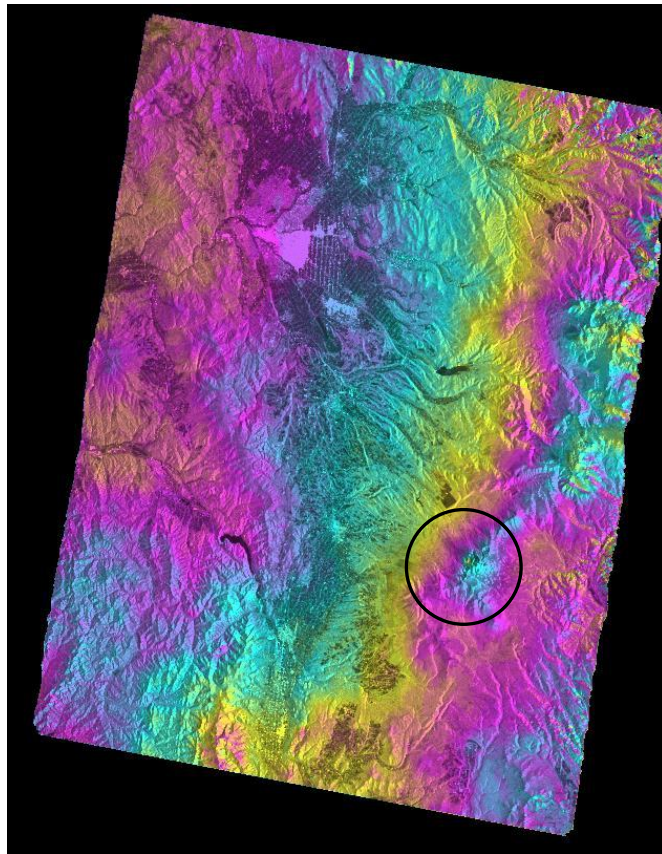


図 32 20060924-20080814 の干渉画像. 基線長は 451m
 表 27 で二重丸で表したペア.
 円で囲まれた領域の中にシグナルが見られる.

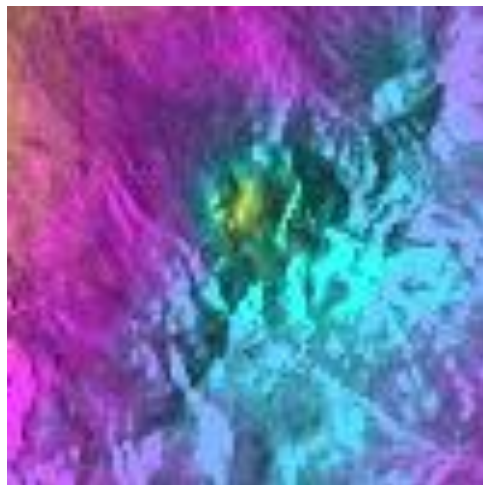


図 33 図 32 中で円で囲った領域の拡大図.
 中心の黄色の部分に地殻変動のシグナル.

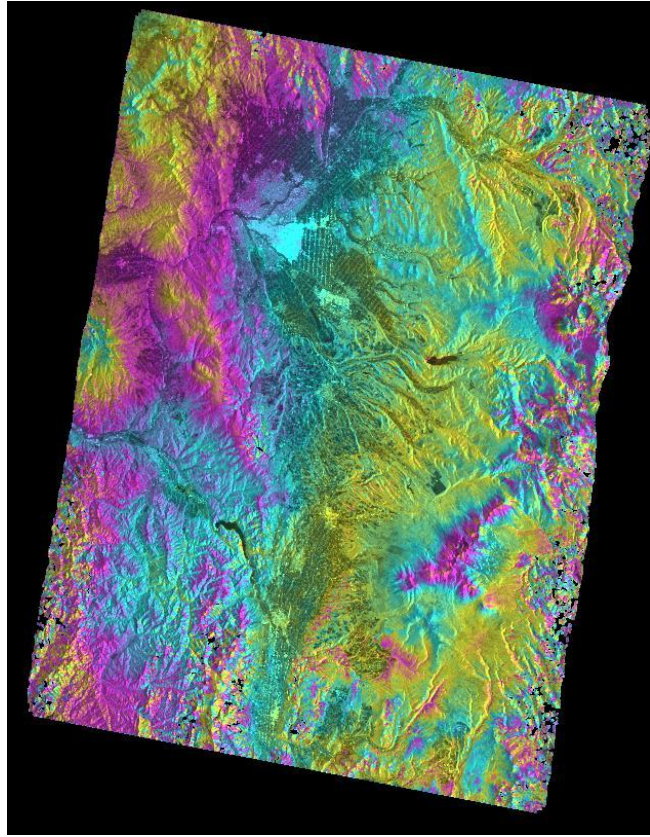


図 34 図 32 から地形相関大気ノイズモデルを引いた図.

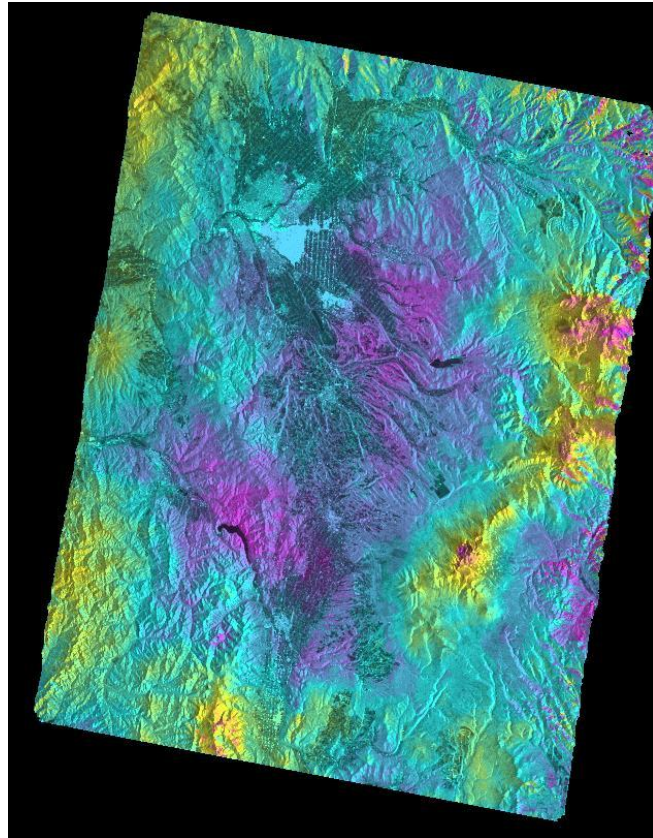


図 35 図 32 から一次の長周期のトレンドのモデルを引いた図

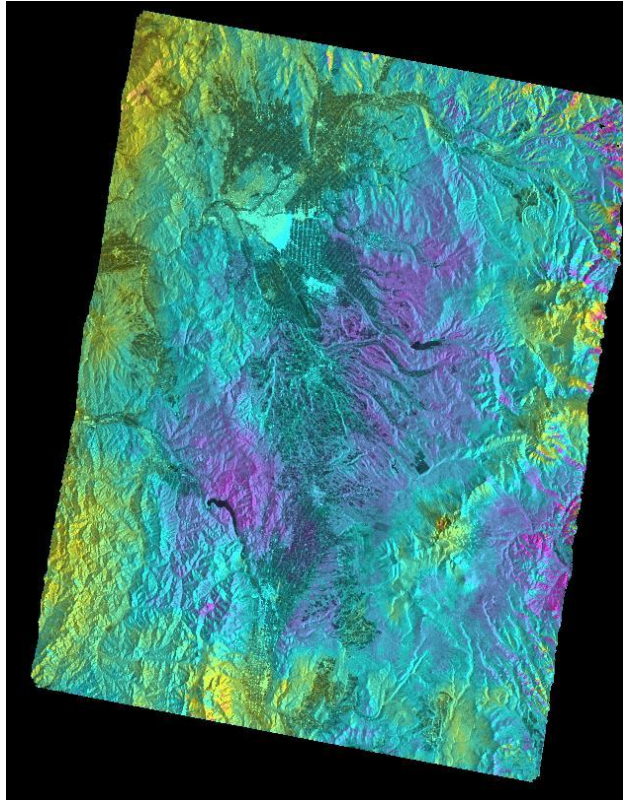


図 36 図 32 から一次の長周期のトレンドモデルを引いて地形による大気の影響を際立たせた後さらに地形相関大気ノイズモデルを作って引いた図.

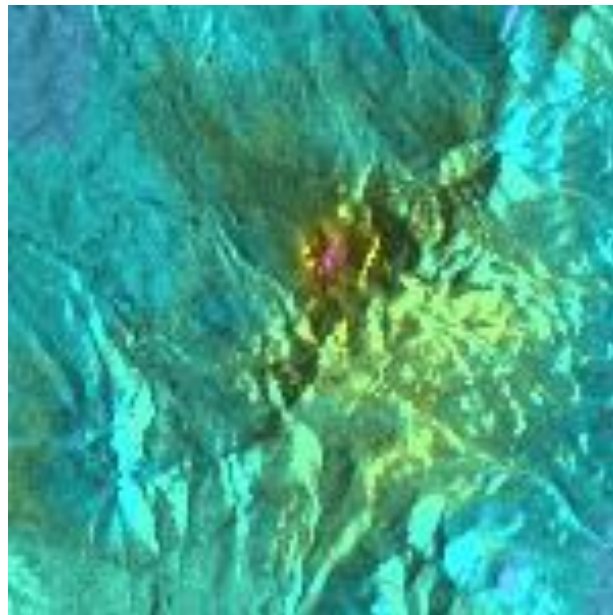


図 37 図 36 のシグナルの部分の拡大図.
シグナルの中心部分は周囲と比べて位相が約 3.5rad 減少しており、衛星の視線方向に約 6.5cm 近づいている。

3 地殻変動の見られる点の茂木モデル(1958)による 地下圧力源の推定

3.1 茂木モデルとは

茂木モデルとは地殻変動がある場合に、変動域の地下に球状の圧力源があると仮定し、地殻変動による地表の変化量を与えることで地下圧力源の深さと体積変化量を推定するモデルである。

3.2 推定結果

最初に図 37 の地表変位を表した図を示す。

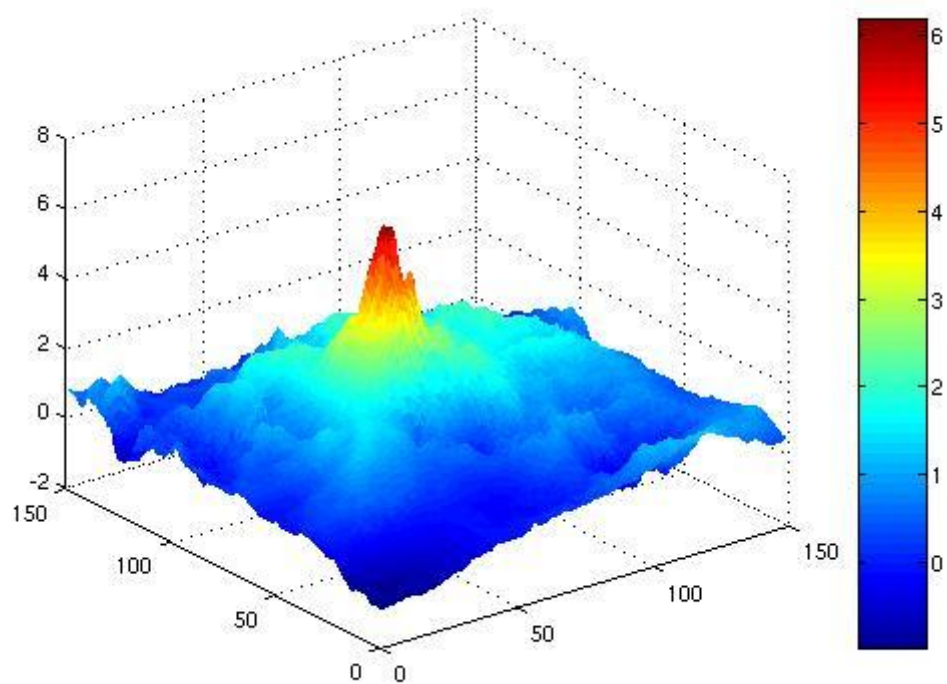


図 38 図 37 の地表変位を表した図。

Scale bar の単位は cm, 図の 0 から 150 までの数値は
干渉画像の pixel 数.

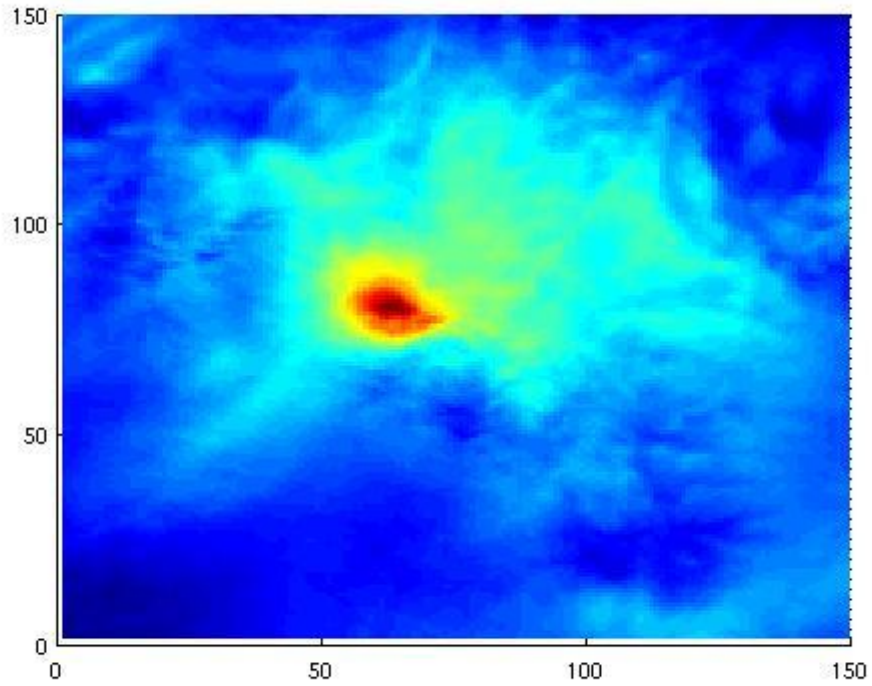


図 39 図 38 を上から見た図

次に茂木モデルにより得られた結果を下に示す. 茂木モデルにより推定された地下圧力源の深さは 1000m, 体積変化量は $3 \times 10^7 m^3$ となった.

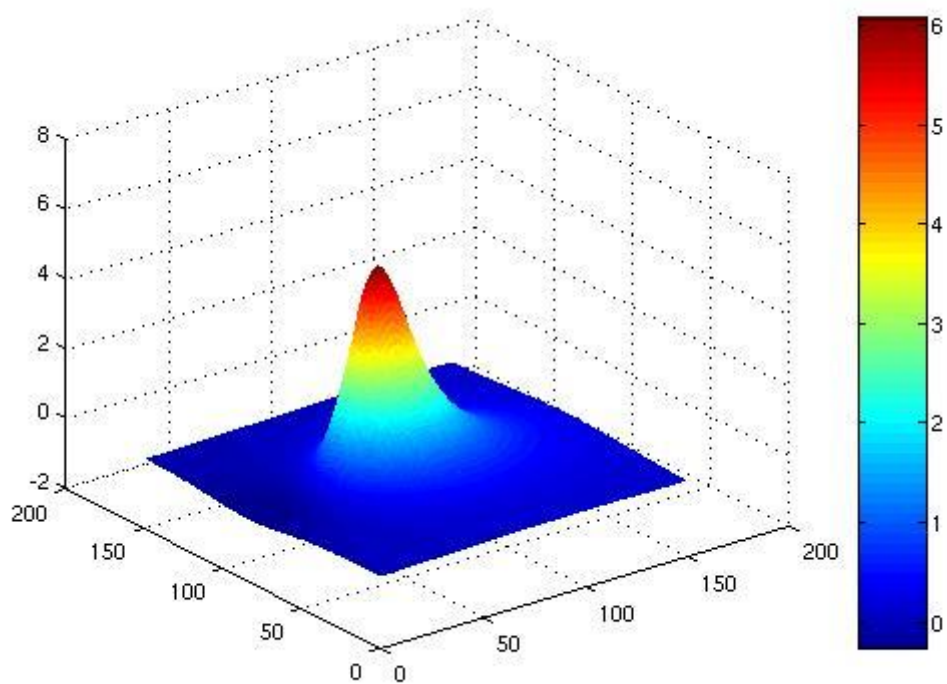


図 40 茂木モデルにより得られた推定結果

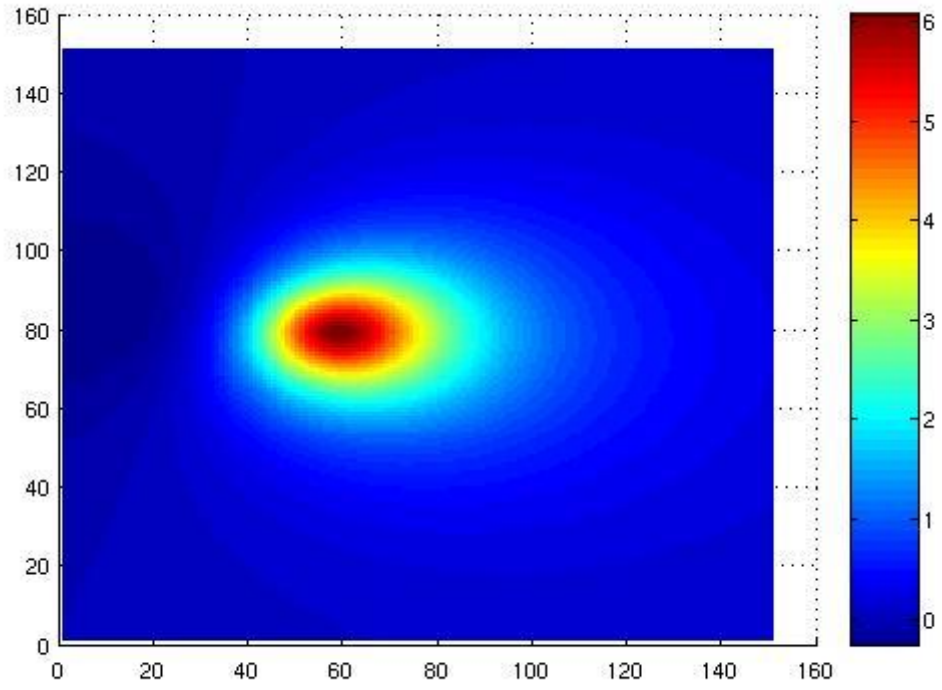


図 41 図 40 を上から見た図

4 考察と課題

今回の研究では **ascending** 側のデータとして 2007 年 6 月 28 日から 2008 年 6 月 30 日までの観測データと **descending** 側の 2006 年 9 月 24 日から 2008 年 8 月 14 日までの観測データを用いたが、地殻変動のシグナルが現れたのは 2006 年 9 月 24 日と 2008 年 8 月 14 日のペアのみであった。札幌管区気象台の火山監視・情報センターの観測では 2006 年 9 月から 62-2 火口付近での膨張が観測されているにもかかわらず、良く干渉している他のペアでは地殻変動のシグナルが見られなかったのは観測データ間の期間が短かったり、基線長がやや長くて山頂付近などで一部干渉がうまくいかずシグナルがうまく出なかったためと考えられる。

2006 年 9 月 24 日と 2008 年 8 月 14 日のペアには 62-2 火口付近に地殻変動のシグナルが見られたので茂木モデルにより地下圧力源の推定をした結果、深さ 1000m、体積変化量 $3 \times 10^7 m^3$ という推定結果が得られた。火山監視・情報センターの観測では十勝岳での火山性地震の震源の深さはおよそ 1000~2000m の比較的浅い所に分布しており、茂木モデルの推定結果は火山監視・情報センターの観測と矛盾しない結果が得られたと思う。これにより十勝岳の火山活動は比較的浅いところで継続して起こっている所以今後の活動にも注目していく必要があると思う。

今回の研究では **InSAR** による地殻変動の検出と茂木モデルによる地殻変動の地下圧力源の推定を行ったが、地殻変動のシグナルが出たのが 1 ペアしかなく活用できていないデータがかなりあるため、今後はこれらのデータを活用できるようにより高度な **SAR** データの解析方法を勉強するとともに、火山や **SAR** そのものについてより知識を身に付けていこうと思う。

5 謝辞

本研究を進めるにあたって自分の担当教員である古屋先生には本研究で行ったことについて何も知らない自分に0から教えていただき、必要なデータや資料も用意していただき無事研究を進めることができました。また、古屋先生に出会ったおかげで InSAR という自分にとって新しい世界を知ることができました。心からお礼申し上げます。また、本研究室修士1年の松尾功二さん、菅原守さんには講義でお世話になりました。本当にありがとうございます。今後は自分の持っている知識を生かし、新しい知識を身に付け、より研究に力を入れていきたいと思っています。今後も古屋先生をはじめ多くの方々にお世話になることと思いますがどうかよろしくお願いします。

また、本研究で用いた PALSAR データは PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our 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。PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にあります。

6 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

鍵山恒臣, 2003, マグマダイナミクスと火山噴火, 朝倉書店, 141—155

大久保修平, 2004, 地球が丸いってほんとうですか?, 朝日選書, 115-141