

# InSAR を用いた釧路平野における 局所的な水位および地盤変動の検出

北海道大学理学部地球科学科  
宇宙測地学研究室

22090178

齊藤 敦

指導教官：古屋 正人 教授

## 概要

近年、人工衛星等を用いて地表を観測する宇宙測地技術は急速に発達しており、GPS (Global Positioning System) は現在でもよく用いられている技術の一つである。しかし、地表に観測点を必要とすることが短所として挙げられる。それに対し、地表に観測点を必要としないという長所から注目されているのが SAR (Synthetic Aperture Radar) を用いた観測である。SAR は地表に照射したマイクロ波の反射波を受信することでデータを得る。そして、InSAR (Interferometric SAR) と呼ばれる技術により、得られた2組の SAR データから地表の変動を観測することができる。地表であっても、静穏な水面等に対しては SAR 反射波の受信ができず、本来観測を行うことはできない。しかし、湿原のように水面上に植生が繁茂している場合には植生によって反射波が生じ、SAR データを得ることができる。これによって観測される変動量は水面の変化に対応するため、InSAR を用いて湿原の水位変化を観測できるとされる。

釧路湿原は貯水機能や野生動物の生育場等多くの機能を有する日本最大の湿原である。しかし人間活動の影響等によって湿原環境の急激な変化が指摘されており、湿原の保全と回復に向けた取り組みが行われている。そこで、これまでに面的な水位変化を目的として釧路湿原を観測した事例は見られないことから、本研究では InSAR を用いた釧路湿原の水位変化の観測を試みた。

InSAR による観測の結果、釧路湿原の北部にある茅沼地区や、釧路湿原の西にある雪裡川の湿原流入部において比較的大きな変動が観測された。さらに、釧路市街地においては市街の境界に沿って変動している様子が干渉画像上で見て取れた。これは通常の地盤沈下のような変動ではなく、時期により浮き沈みのある変動であり、このような事例は通常見られない。そこで、釧路平野の降水量のデータと比較しながら、変動の原因についての考察を行った。

# 目次

1. はじめに	1
1.1. 研究目的	1
1.2. 宇宙測地技術の発達	1
1.3. SAR	2
1.3.1. SLC 画像の作成	3
1.3.2. InSAR	6
1.3.2.1. 干渉画像の作成	7
1.3.2.2. 干渉画像の解析	8
1.3.2.3. マイクロ波の特性	9
1.4. ALOS / PALSAR	9
2. 釧路平野における局所的変動の検出	12
2.1. 観測地域	12
2.2. 使用データ	14
2.2.1. ALOS/PALSAR データ	14
2.2.2. DEM	14
2.3. InSAR による局所的変動の検出	15
3. 局所的変動の原因の考察	28
3.1. 湿原北部	29
3.2. 釧路市街地	31
4. まとめ	33
5. 謝辞	34
6. 参考	35

## 1. はじめに

### 1.1. 研究目的

SAR (Synthetic Aperture Radar) は、マイクロ波の照射と反射波の受信を同時に行うことで高い分解能の画像を得ることのできるレーダーである。その詳細は次節以降で述べるが、SAR を応用することで地表面における変動を観測することができる。ただし、地表であっても静穏な水面等電波の反射波が弱くなってしまう領域では通常 SAR による観測を行うことはできない。しかし湿原のように水面上に植物が繁茂している場合には、水面によって前方に反射した電波が植物によって再度反射されることで後方散乱が発生し、それを受信することによって干渉が得られることが知られている。この時に測定される変位量は水位の変化に対応するため、InSAR を用いることで湿原の水位変化を観測することができる。この試みはフロリダ半島南端に広がるエバーグレイズ国立公園等を対象に既に行われており (Wdowinski et al., 2004)、InSAR が湿原環境のモニタリングにも応用できることが実証されている。

釧路湿原は貯水機能や野生生物の生育場等の重要な働きを有する国内有数の湿原であり、同時に湿原面積の減少や湿原の乾燥化といった湿原環境の急激な変化に伴い、湿原環境の保全や回復に向けた取り組みが行われている (釧路湿原国立公園連絡協議会, 2007)。国土地理院では釧路平野を地盤沈下観測地域として定常的な監視を行っているものの、面的に釧路湿原の水位変化を目的として観測した事例はこれまでに見られない。そこで本研究では釧路湿原を含む釧路平野を対象として InSAR による観測を行い、湿原における水位変化の解析と考察を試みた。

### 1.2. 宇宙測地技術の発達

測地学は、紀元前 3 世紀のエラトステネスによる地球半径の測定に端を発するとされる。時が経つにつれてその技術は発展し、16 世紀頃には三角測量や水準測量といった地上測量技術が、1970 年代には GPS (Global Positioning System ; 全地球測位システム)、VLBI (Very Long Baseline Interferometer ; 超長基線電波干渉計)、SLR (Satellite Laser Ranging ; 人工衛星レーザー測距) といった宇宙測地技術が登場した。その結果、今や測定精度は mm のオーダーへと達し、GPS をはじめとするこれらの技術は現在でも広く用いられている。しかし、いずれも地上に観測点を必要とすることが短所の一つとして挙げられる。例えば観測点の設置が困難である地域を観測したい場合には適用が難しく、これらの技術が共通して抱えている問題となっている。

そのような状況の中で注目されているのが、SAR (Synthetic Aperture Radar ; 合成開

口レーダー) を利用した観測技術である。SAR はマイクロ波の照射と反射波の受信を同時に行う能動型センサーであり、その最大の特長は地上に観測点を必要としないという点にある。そのため、GPS 等のように観測点の分布に制限されることなく、SAR のマイクロ波が照射される面全体という広い範囲のデータを得ることが可能である。また、比較的波長の長いマイクロ波を用いているため、太陽光の有無や天候に左右されないという利点もある。その有用性から現在 SAR は人工衛星や航空機に搭載されており、地形図の作成や地殻変動の計測をはじめ、雪氷や農学等多くの分野で応用されている。

### 1.3. SAR

レーダーを用いた観測では、発射した電波の対象物からの反射波を観測する。この時の反射波の電波強度から対象物表面の性質や大きさを測定できるほか、電波が戻ってくるまでの時間を計測することで対象物までの距離を知ることができる。レーダーで観測を行う際に問題となるのは空間分解能、つまりどこまで細かく対象物を観測できるかということである。一般に空間分解能を向上させるためには用いるアンテナを大きくする必要がある。しかし、地表で 10m 程度以上の分解能を実現するためには 1 km 程のアンテナの大きさを要してしまうため、現実的に衛星に搭載することは難しい。そこで、アンテナを搭載した衛星等のプラットフォームが移動しながら電波を送受信することで、あたかも大きなアンテナを用いたかのように高い分解能の画像を得る技術が SAR (Synthetic Aperture Radar; 合成開口レーダー) である。

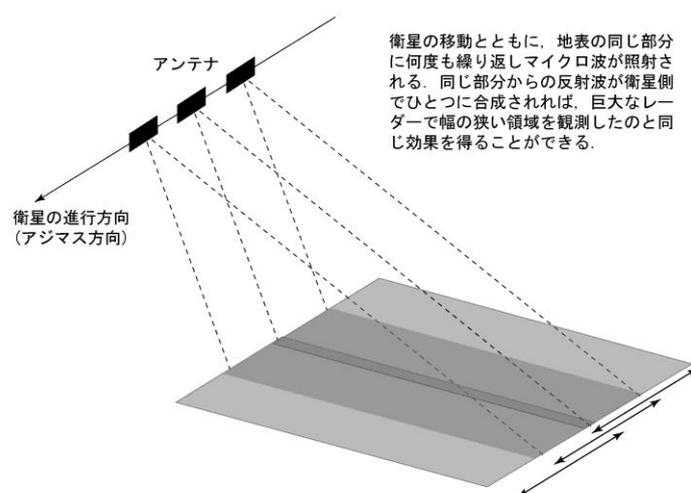


図 1 : アンテナの合成開口の原理

測地学テキスト (<http://www.geod.jpn.org/web-text/part2/2-4/2-4-1-4.html>) より

レーダーを真下に向けて照射した場合、進行方向の左右において距離の等しい点からの反射波を区別することができない。それを回避するため、斜め下に向けて電波の送受信を行っているようなレーダーをサイドルッキングレーダーと呼び、SAR も斜め下へ向かって電波を照射している。なお、SAR では衛星や航空機等のプラットフォームが移動する方向をアジマス (Azimuth) 方向、マイクロ波の照射方向をレンジ (Range) 方向と呼称する。

### 1.3.1. SLC 画像の作成

SAR が受信する生のデータは、見ただけではそれが何を示すものかは分からない。この生データを処理して得られる画像のことを SLC 画像 (Single Look Complex Image ; 複素画像) と呼び、直ちに解釈ができる最初の画像となる。実際にはこの SLC 画像を見る機会は少なく、SLC 画像の複素数データの実部と虚部の二乗和の平方根をとり平均化した強度画像を目にすることの方が多い。まずこの節では古屋 (2006) および日本リモートセンシング学会 (2011) を参考に SLC 画像の作成方法について述べる。

まず SAR が受信した生データから SLC 画像を作成するには、大まかに Range 方向の圧縮処理、Azimuth 方向の圧縮処理という 2 つの処理を行う。SAR に限らずレーダーはパルスの送受信を行うことでデータを取得するが、ここで単純な矩形パルスを用いた場合、Range 方向の分解能はパルスの持続する時間によって決定する。ある点反射源によって反射された信号は、送信パルスと等しいパルス幅で送信時刻から往復時間だけ遅れた位置に記録される。このとき、点反射源同士の距離が短い場合には受信信号が重複するため、両者の区別ができなくなってしまう。

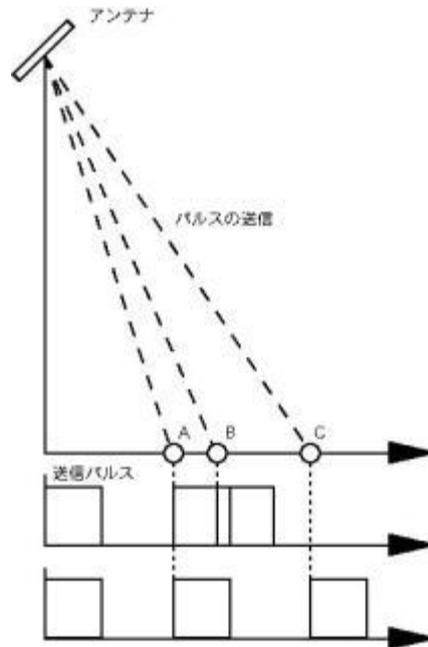


図2：矩形パルスを用いた場合の分解能

図の場合，点反射源AとBでは距離が近く，受信信号が重複してしまう。

このことから，分解能幅は受信する信号が隣接する時となる。しかし，パルス幅を短くするためには高い信号対雑音比 (S/N) を得るために高出力のパルスを連続して放射する必要があり，特に衛星に搭載されているレーダーでは電力供給の点で困難が伴う。そこで，チャープパルス (Chirp Pulse) を用いて受信信号に処理を施して高分解能を実現させる技術がパルス圧縮 (Pulse Compression) である。チャープパルスとは周波数が時間の一次関数として変化するパルスのことで，以下のようなパルス波形で表現される：

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

ここで  $T_p$  はパルス継続時間， $f_c$  は中心周波数， $K_r$  はチャープ率であり， $\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)$  は長さ  $T_p$  の矩形関数を示す。いまセンサーからの距離  $R$  に点反射源があるとすると， $t_0$  秒後に帰ってくる反射波は次のようになる：

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

これが生データとなるが，実際には高周波成分を落とし，低周波な複素数データとして記録される：

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

しかし受信する生データには一般にノイズが多く含まれるため，これに整合フィルター

(Matched Filter) を通して反射信号を抽出する。このフィルターを通した後の出力は振幅が増大しパルス幅が減少するという性質を有する：

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

その結果、あたかもパルス幅の短いパルスを送受信したかのような効果を得ることができ。実際、同じパルス幅  $T_p$  でもチャープパルスを用いない場合の分解能  $\Delta r$  は、光速を  $c$  として

$$\Delta r = \frac{c T_p}{2}$$

であるのに対して、パルス圧縮後の分解能  $\Delta r'$  は

$$\Delta r' = \frac{c}{2 K_r T_p}$$

となり、 $K_r T_p^2$  倍に圧縮されている。ここに実際に数値を入れてみると、実に数百倍も圧縮されていることになる。

以上のようなパルス圧縮技術から Range 方向の圧縮処理がなされているが、既存の高分解能のレーダーではその大部分で同様なパルス圧縮が行われており、SAR も例外ではない。その一方、以下で述べる Azimuth 方向の圧縮処理技術（アジマス圧縮）が SAR の持つ特長であり、原理的にはパルス圧縮と似ている。一つの点反射源から得られるデータは、一つのパルスの反射波で得られるというわけではない。衛星は移動をしながら一定の時間間隔でパルスを発射しており、SAR アンテナの視界に入っている間に得られる複数のパルスの重ね合わせによってその点反射源のデータを得ている。しかし、衛星の地表に対する相対運動の影響で反射波にドップラー効果が生じ、周波数は少しずつ変化する。したがって、これらの反射波をチャープパルスと同様に扱うことが可能となり、整合フィルターを用いることによって Azimuth 方向の分解能を高めることができる。電波伝播理論の上では、波長を  $\lambda$ 、アンテナの Azimuth 方向の長さを  $L$  とするとアンテナから距離  $R$  の点における分解能  $\Delta a$  は

$$\Delta a = \frac{R \lambda}{L}$$

で表され、実距離にして数 km から 10km 程度となってしまう。しかし、整合フィルターを用いることで  $L$  を大きくすることと同様の効果を得ることができ、結果としてあたかも Azimuth 方向にアンテナを幾つも並べたかのような分解能を得ることができる。これが合成開口という名の所以である。SAR のアジマス圧縮を行うことで得られる最終的な分解能  $\Delta a'$  は

$$\Delta a' = \frac{L}{2}$$

となり、これはアンテナの高度や波長によらずアンテナサイズのみによって分解能が決ま

ることを意味する。これは SAR において特徴的な性質である。

以上のような圧縮処理を経ることで複素画像（SLC 画像）を得ることができ、そのデータの複素数の大きさから反射強度を計算することで強度画像を得ることができる。



図 3：SAR データより得られた強度画像

### 1.3.2. InSAR

InSAR (Interferometric SAR；干渉 SAR) は SAR の応用技術として認知されているものの一つである。同一のある領域に対して 2 回の観測を実施し、得られた 2 枚の画像を干渉させて差をとることで衛星視線方向の距離差が測定できる。その原理は光の干渉現象の一つとして知られるニュートンリングと似ている。平面ガラスの上に凸レンズを置いたのちレンズの上方から単色光を入射させると、平面ガラスと凸レンズの 2 つの反射光の光路差に応じて同位相部分では光が明るく、逆位相部分では暗くなって現れる。

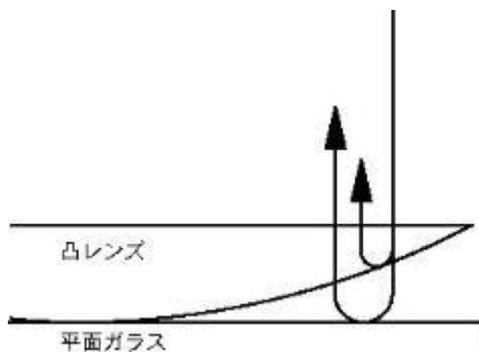


図 4：ニュートンリングの原理図

凸レンズで反射した光と平面ガラスで反射した光が干渉する。

これがニュートンリングの原理であり、InSARにおいても同様に考えることで理解できる。SAR が反射波から得るデータには位相の情報が含まれている。そこで2回の観測で得られた位相の差をとることにより、2つの観測時点の間に生じた地表変動を検出することができる。数学的には、2枚のSLC画像の複素共役の積の規格化である。現実の観測では位相差を生じさせる要因は複数あり、それらを補正することによって地表変動に伴う干渉縞（変動縞）を得ることができる。以下1.3.2.1節にてInSARによる干渉画像を得るまでの流れを述べる。

### 1.3.2.1. 干渉画像の作成

干渉画像を作成するためには、まず2枚のSLC画像内の各ピクセルを対応させる作業（位置合わせ（Image Registration；画像マッチング））が必要である。SAR衛星は一定の時間間隔で同一の軌道に回帰するが、ピクセル単位で一致しているわけではない。そのため、SLC画像同士のピクセルの対応付けを行わなければ干渉画像を得ることができない。

位置合わせを行うと初期干渉画像が得られる。しかし、この初期干渉画像には地表変動による変動縞のほか、2つの観測軌道の違いに起因する軌道縞や地形の起伏による地形縞等が含まれている。したがって、変動縞のみを抽出するためには軌道縞や地形縞を補正する作業を行う必要がある。軌道縞については、衛星の軌道情報から計算することで除去できる。また、地形縞に関しても高分解能の数値地図であるDEM（Digital Elevation Model；数値標高モデル）を利用すれば幾何的な計算によって補正することができる。DEMについては後に詳述する。

以上の過程により、基本的には変動縞のみが残った干渉画像が得られる。しかし、この時点での位相データは実際の位相を $2\pi$ で割った余りであるため、 $2\pi$ の任意性を含んでいる。この任意性を取り除く作業が位相アンラッピング（Phase Unwrapping）と呼ばれるものであり、これを行うことにより変動量の絶対値を知ることができる。なお、地形の起伏が大きい場合や、対象物の反射特性が異なることにより干渉性が低い場合には位相アンラッピングは必ずしも単純ではなく、不可能な場合も存在する。

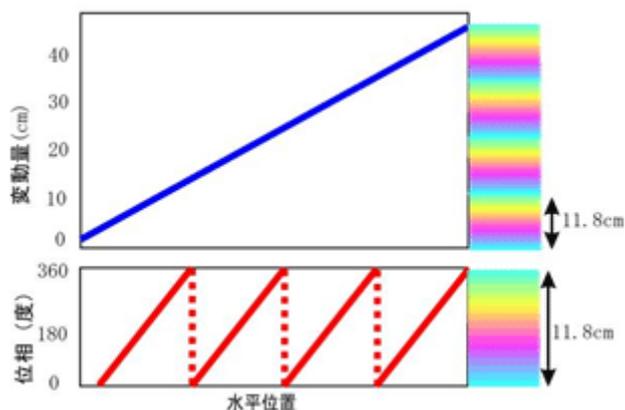


図5：位相アンラッピングの概念図

国土地理院：干渉 SAR (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism04.html>) より

最後に観測データの座標を変換するジオコーディング (Geocoding) を行う。SAR で観測されたデータは Range-Azimuth 座標となっているため、これを地図上の緯度経度座標 (UTM (Universal Transverse Mercator) 座標) に対応付ける。こうして最終的な干渉画像が完成し、これをもとに地表変動の解析を進めていく。

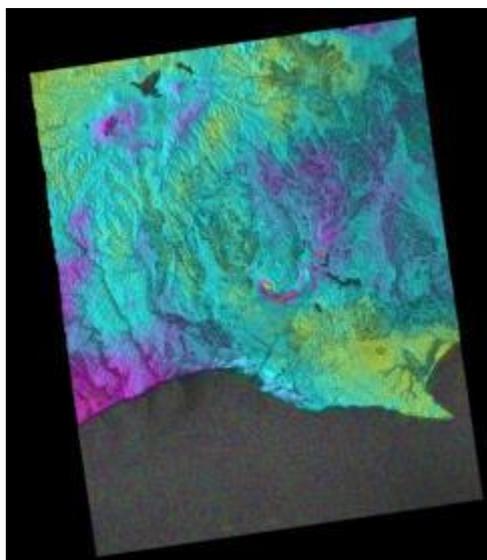


図6：最終的に得られた干渉画像

斜めに傾いているのは、衛星軌道が南北方向に対して傾いているためである。

### 1.3.2.2. 干渉画像の解析

InSAR から読み取れる測定量は、SAR アンテナと地表を結ぶ直線方向 (LOS (Line Of

Sight) ;衛星視線方向) の変動量である。実際に地表の変動があった場合、その変動は東西、南北、鉛直方向の3次元変位で表されるが、それを衛星視線方向へ投影したときの変動量がInSARによって測定される変動量となる。そのため、InSARで測定される量だけでは各方向の実際の変動量を判断することはできない。ただし、地盤沈下のように水平成分の変動が無いとみなせる場合においては、幾何的に隆起あるいは沈下の変動量を求めることができる。

また、InSAR画像から読み取れる変動量は絶対量ではなく、画像の基準点に対する相対量である。したがって、変動の絶対量を求める場合には変動量がゼロである点の仮定や他の観測データの参照等をする必要がある。

### 1.3.2.3. マイクロ波の特性

SARアンテナは、アンテナから放射したマイクロ波が地表の電導体や誘電体に入射した際に生じる後方散乱を反射波として受信し、画像処理を行う。地上に電波を反射する物体が無い場合では電波が前方に反射して返ってこないため、全く波が立っていない水面や飛行場の滑走路等からの反射波は非常に弱く、画像上では暗くなってしまう。その一方で、地上の粗い面では入射波があらゆる方向に散乱されて後方散乱成分を受信できるため、画像上は明るく写る。

InSARでは、Xバンド(波長2.5~3.8cm)、Cバンド(波長3.8~7.5cm)、Lバンド(波長15.0~60.0cm)と呼ばれる波長帯の電波がよく用いられる。一般に波長の短い電波を用いた方が分解能は高くなるが、XバンドやCバンドのマイクロ波で森林地帯を観測する場合、マイクロ波は森林内部には侵入できずに樹冠部分で電波が反射する。そのため、2回の観測では木の揺れや生長によって干渉が阻害されてしまう。一方、Lバンドの電波は植生を透過できるため、森林地帯であっても地面からの反射波を受信することができる。

## 1.4. ALOS / PALSAR

ALOS (Advanced Land Observing Satellite ; 陸域観測技術衛星 (日本名 : 「だいち」)) は、2006年1月24日にJAXA (Japan Aerospace Exploration Agency ; 宇宙航空研究開発機構) により打ち上げられた地球観測衛星である。地図の作成や地域観測、災害状況の把握や資源調査等への貢献を目的として活躍していたが、2011年4月22日に電力異常のため交信不能となり、同年5月12日に運用を停止した。



図7：ALOS のイメージ画像

JAXA ([http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html)) より

表1：ALOS の主な仕様

質量	約 4,000kg
軌道	太陽同期準回帰軌道 (回帰日数 46 日)
軌道高度	約 690km (軌道長半径 7,070km)
軌道傾斜角	約 98 度
姿勢制御方式	三軸姿勢制御方式 (高精度姿勢軌道決定機能)

ALOS に搭載されている観測機器には、地表の地形データを読み取る PRISM (パングロマチック立体視センサー)、土地表面の状態や利用状況を知るための AVNIR-2 (高性能可視近赤外放射計 2 型)、昼夜や天候によらずに陸地の観測ができる 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 つがある。この内の PALSAR が本研究に用いたもので、JERS-1 (地球資源衛星 1 号 (日本名:「ふよう」)) に搭載された SAR の性能を向上させた能動型センサーである。また、PALSAR は高分解能観測モード、広域観測モード (ScanSAR) 等を持っている。

表2：PALSAR の主な仕様（高分解能モード）

中間周波数	1,270MHz (L-band)	
モード	FBS	FBD
バンド幅	28MHz	14MHz
地上分解能	7~44m	14~88m
観測幅	40~70km	

JERS-1 が 1998 年 10 月に運用を停止して以来, ALOS は初めてLバンドの SAR を搭載した衛星となっている.

## 2. 釧路平野における局所的変動の検出

### 2.1. 観測地域

釧路湿原は釧路市に隣接して南北 36km, 東西 25km に跨る日本最大の湿原であり, 湿原の北, 東, 西方は小高い台地や丘陵地に取り巻かれている. 湿原面積は 20,440ha に及び, 1980年にはそのうちの7,863haが日本で最初のラムサール条約登録湿地として登録された. また 1987年には湿原を含む 26,861ha が国立公園に指定されている (釧路市地域史料室, 2008).



図8：釧路湿原の位置

黄線で囲まれた部分が釧路湿原である.

環境省 釧路湿原自然再生プロジェクト/湿原データセンター (<http://kushiro.env.gr.jp/saisei/>) より



図9：釧路湿原の様子

2012年11月28日, 温根内ビジターセンターの南約3kmにある駐車場より著者撮影.

一般的に湿原は河川や地表水によって涵養される富栄養の低層湿原，主に降水によって涵養される貧栄養の高層湿原およびそれらの中間の環境である中間湿原に分類され，釧路湿原はその大部分が低層湿原に分類される．高層湿原や中間湿原は一部分に存在するのみであり，低層湿原に代表的な植物であるヨシやスゲが釧路湿原の多くの面積を占めている．湿原を主に涵養する河川には釧路川が挙げられ，湿原を南北に縦貫流している．その他にも仁々志別川をはじめ，幌呂川，雪裡川，久著呂川等湿原には数多くの河川があり，それぞれが曲蛇行して複雑な流跡を描いている．また，釧路川は湿原地域の開発のためこれまで多くの改修が行われており，釧路川の他に仁々志別川や雪裡川等でも直線化が行われた部分がある（岡崎, 2010）．

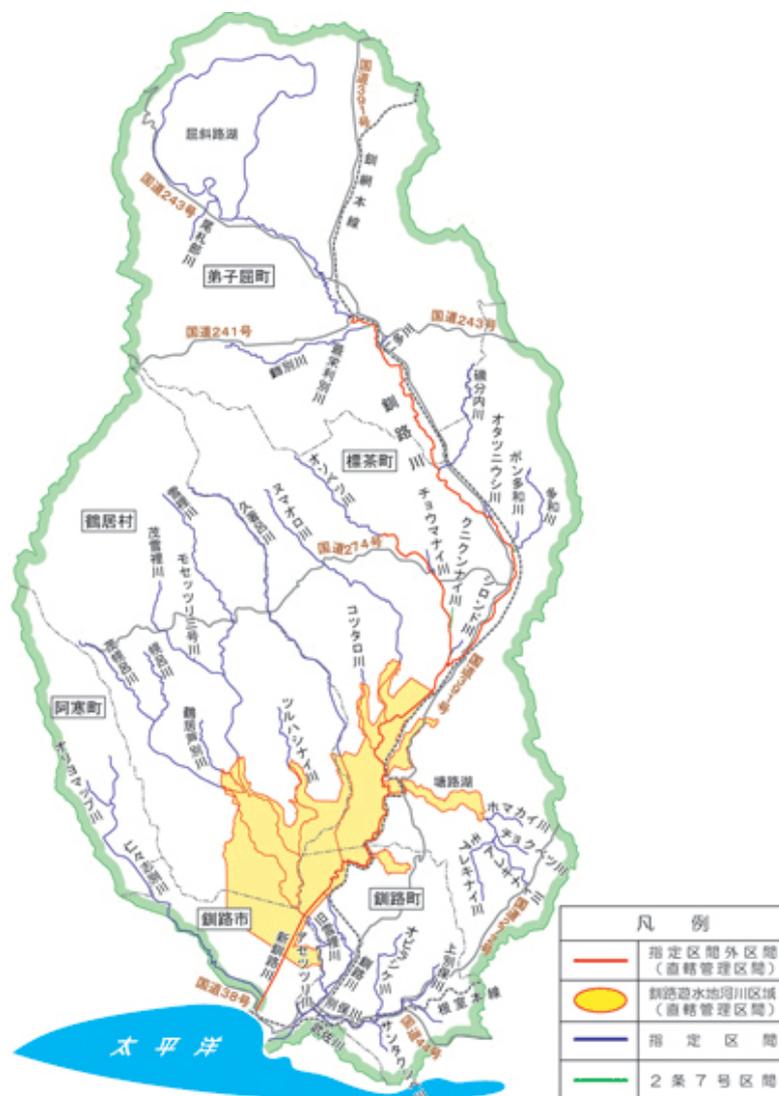


図 10：釧路川水系の地図

国土交通省 ([http://www.mlit.go.jp/river/toukei\\_chousa/kasen/jiten/nihon\\_kawa/81012/81012-1.html](http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/81012/81012-1.html)) より

## 2.2. 使用データ

### 2.2.1. ALOS/PALSAR データ

本研究では、釧路平野を含んだ Path 394, Frame 850 のデータを使用した。また、軌道は北行軌道 (Ascending) である。なお、解析には Gamma 社の Gamma Software を使用しており、使用したデータは以下の通りである。

表 3：使用したデータ

受信する偏波の違いにより、データは2つのモードに分類される。

表 2 の通り、FBD のバンド幅は FBS の半分であり、Range 方向の分解能も FBS の半分となっている。

データ (YYYYMMDD)	モード	データ (YYYYMMDD)	モード
20061221	FBS	20090210	FBS
20070808	FBD	20090628	FBD
20070923	FBD	20090813	FBD
20080208	FBS	20090928	FBD
20080325	FBS	20091229	FBS
20080510	FBD	20100516	FBD
20080625	FBD	20100701	FBD
20080810	FBS	20100816	FBS
20080925	FBD	20101001	FBD
20081226	FBS	20110101	FBS
		20110216	FBS

以上から適当なデータの組を選択して InSAR による解析を行った。1 回目と 2 回目の観測における SAR 衛星の軌道間距離の垂直成分 (Bperp.) が大きい場合、後方散乱波の相関が低くなり干渉性が低下する。この値が 2000m 以上の時には干渉処理が上手くいかないことが多くなると言われており、本研究では 2000m 以下となるデータの組を選択した。

### 2.2.2. DEM

前述の通り、DEM (Digital Elevation Model ; 数値標高モデル) とはデジタル標高データのことであり、SAR データの処理過程においては地形に起因する縞 (地形縞) を取り除

くために使用される。本研究では国土地理院が 2008 年より提供を開始した 10 メートルメッシュ標高データ (10mDEM) を使用した。

### 2.3. InSAR による局所的変動の検出

以下図 12 より InSAR による干渉画像を示す。InSAR による干渉画像では、地表の変動が色によって表現される。このとき青色を基準として、青から赤へと変化する領域では衛星から遠ざかる方向に、また青から黄へと変化する領域では衛星に近づく方向に変動していることを表す。同じ色で表される地点同士では L バンドの SAR 電波の半波長の長さにあたる 11.8cm の整数倍の変動量の差を持っており、色が 1 周すると 11.8cm の変動量の差となる。

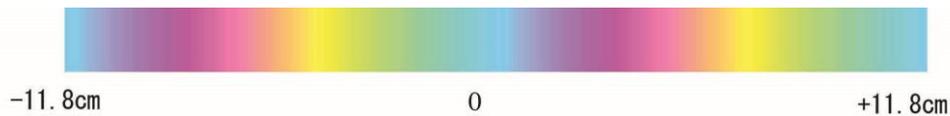


図 11：干渉縞のカラーバー

ここで負の変動量が衛星に近づく方向の変動量を表し、正の変動量が衛星から遠ざかる方向の変動量を表す。前述のように実際の変動量を衛星視線方向へ投影したものが InSAR により観測される変動量となるが、地表変動の水平成分がゼロであるとみなせる場合には、衛星に近づく変化が隆起、衛星から遠ざかる変化が沈下であるとする事ができる。釧路平野における変動の観測では水平成分はほぼゼロであると考えられるので、以下衛星に近づく方向を隆起（上昇）方向、衛星から遠ざかる方向を沈下（下降）方向として述べる。

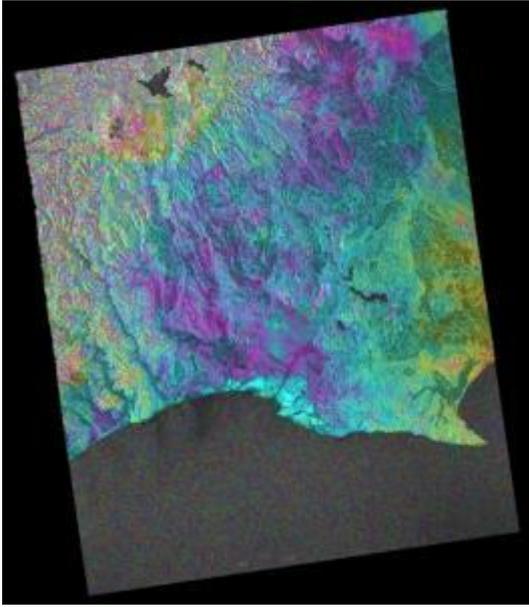


図 12 : 20061221\_20070808 の干渉画像  
Bperp.は 1864.90m, 期間は 230 日である.

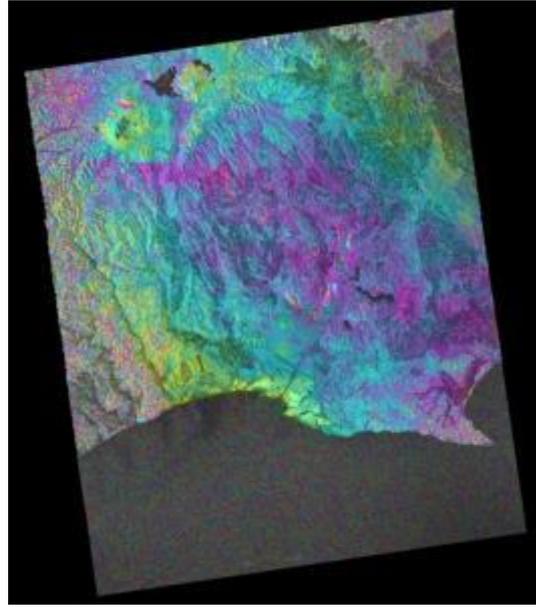


図 13 : 20061221\_20070923 の干渉画像  
Bperp.は 1739.95m, 期間は 276 日である.

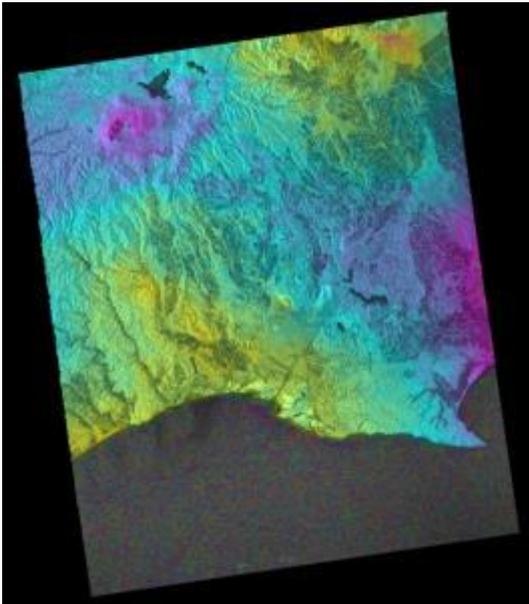


図 14 : 20070808\_20070923 の干渉画像  
Bperp.は 123.71m, 期間は 46 日である.

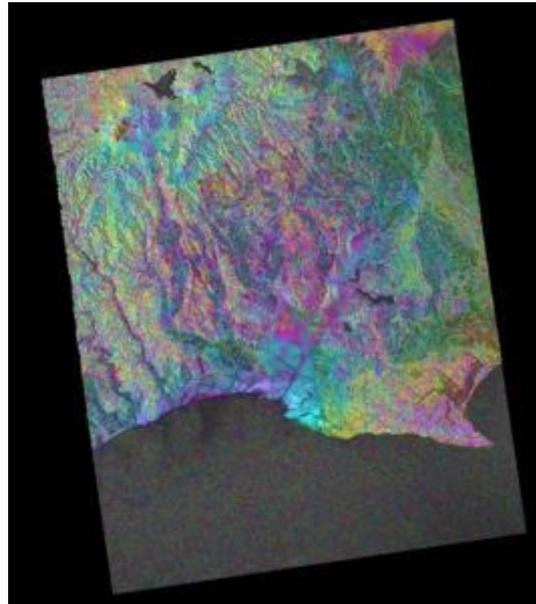


図 15 : 20070808\_20080208 の干渉画像  
Bperp.は 1404.30m, 期間は 184 日である.

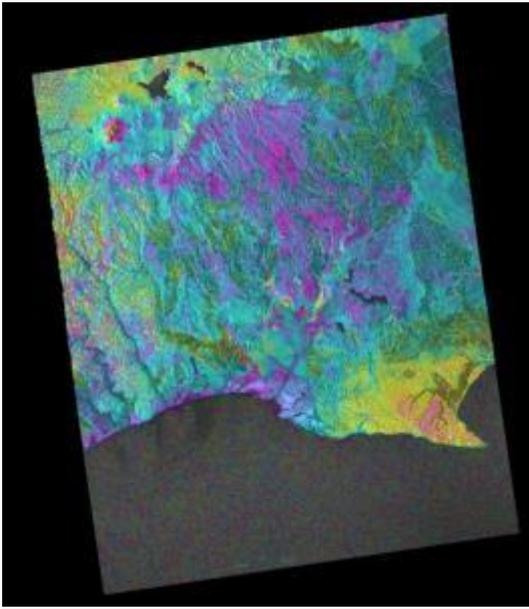


図 16 : 20070808\_20080325 の干渉画像  
Bperp.は 1582.64m, 期間は 230 日である.

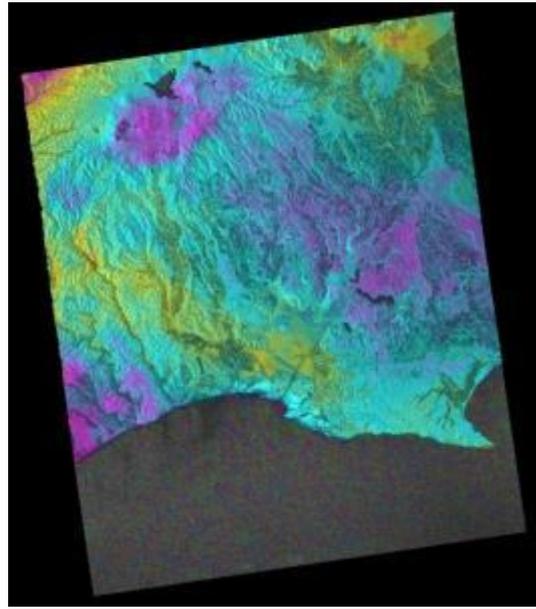


図 17 : 20070808\_20080625 の干渉画像  
Bperp.は 883.54m, 期間は 322 日である.

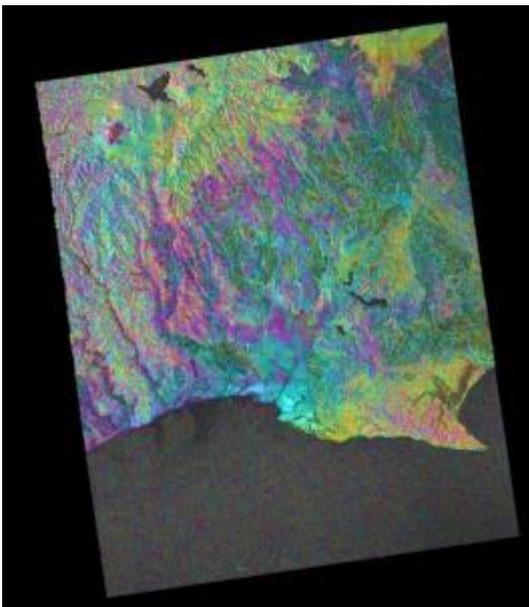


図 18 : 20070923\_20080208 の干渉画像  
Bperp.は 1528.70m, 期間は 138 日である.

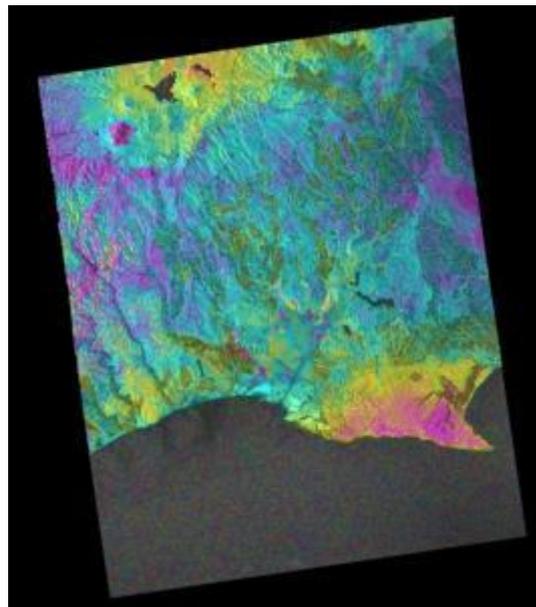


図 19 : 20070923\_20080325 の干渉画像  
Bperp.は 1707.36m, 期間は 184 日である.

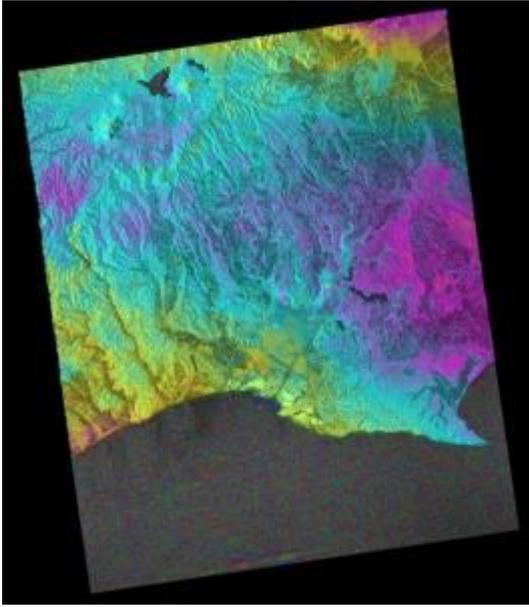


図 20 : 20070923\_20080625 の干渉画像  
Bperp.は 760.59m, 期間は 276 日である.

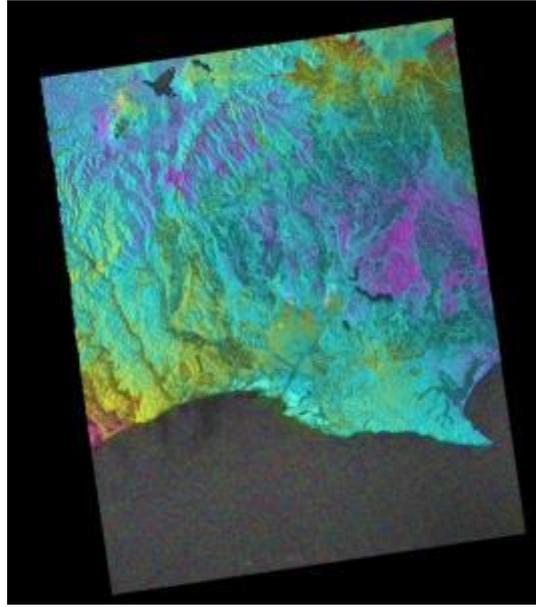


図 21 : 20080208\_20080325 の干渉画像  
Bperp.は 178.58m, 期間は 46 日である.

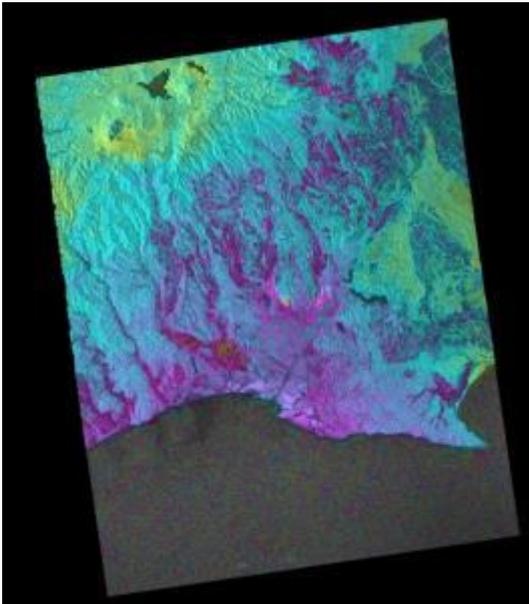


図 22 : 20080325\_20080510 の干渉画像  
Bperp.は 562.94m, 期間は 46 日である.

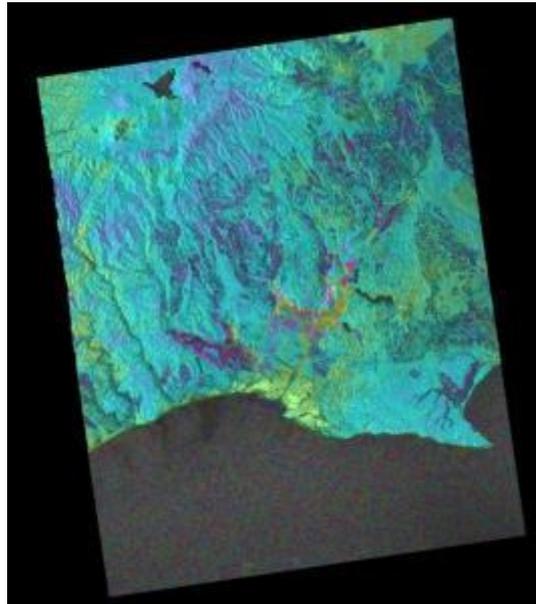


図 23 : 20080325\_20100516 の干渉画像  
Bperp.は 793.24m, 期間は 782 日である.

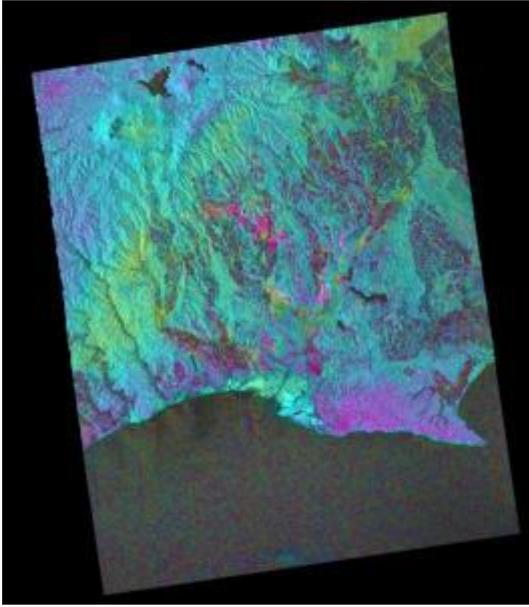


図 24 : 20080325\_20101001 の干渉画像  
Bperp.は 45.46m, 期間は 920 日である.

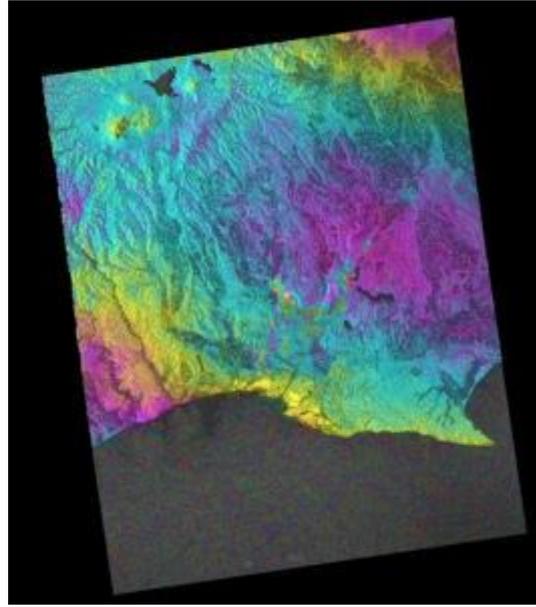


図 25 : 20080510\_20101001 の干渉画像  
Bperp.は 517.42m, 期間は 874 日である.

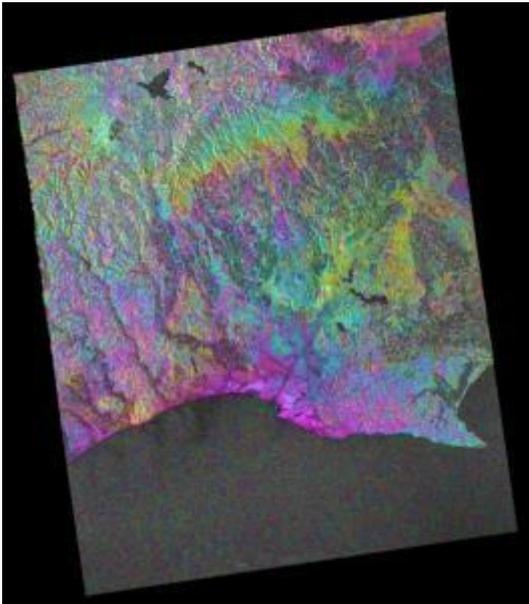


図 26 : 20080625\_20090210 の干渉画像  
Bperp.は 1272.66m, 期間は 230 日である.

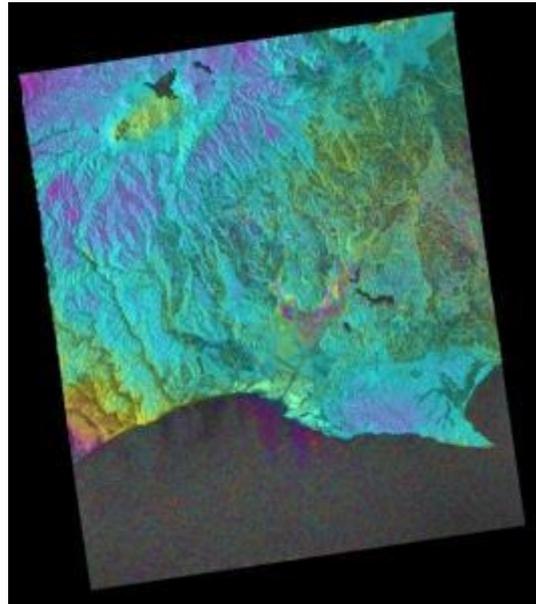


図 27 : 20080625\_20090628 の干渉画像  
Bperp.は 501.42m, 期間は 368 日である.

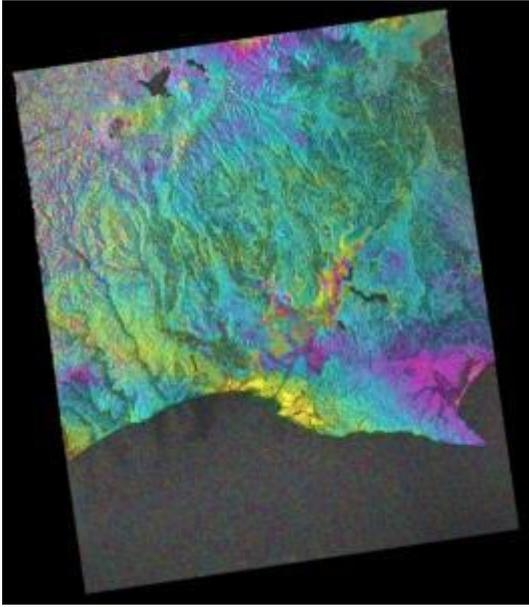


図 28 : 20080625\_20090813 の干渉画像  
Bperp.は 563.61m, 期間は 414 日である.

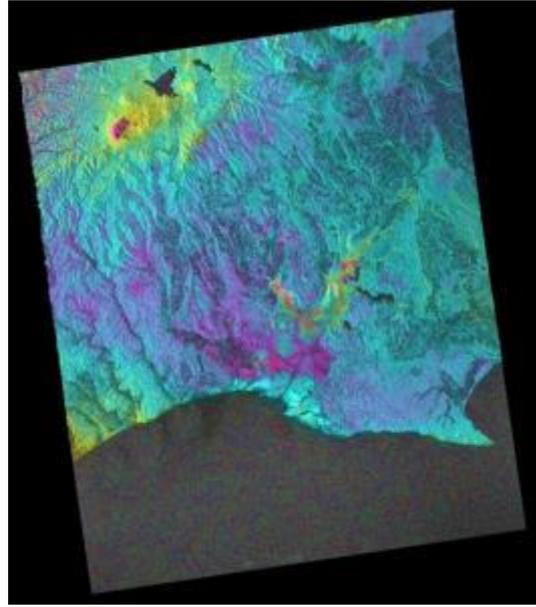


図 29 : 20080625\_20080928 の干渉画像  
Bperp.は 38.03m, 期間は 460 日である.

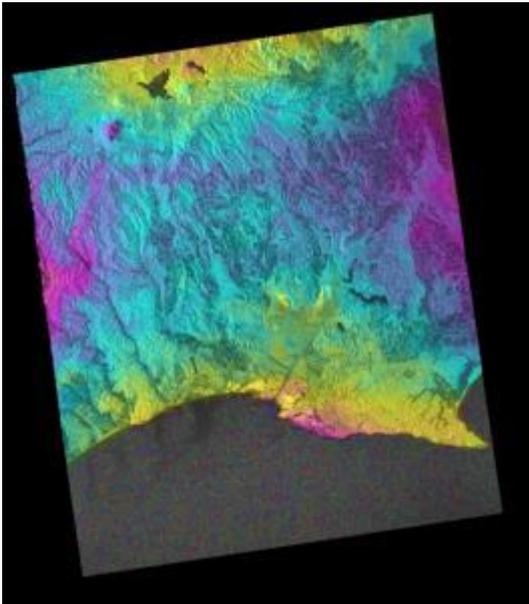


図 30 : 20080810\_20080925 の干渉画像.  
Bperp.は 851.46m, 期間は 46 日である.

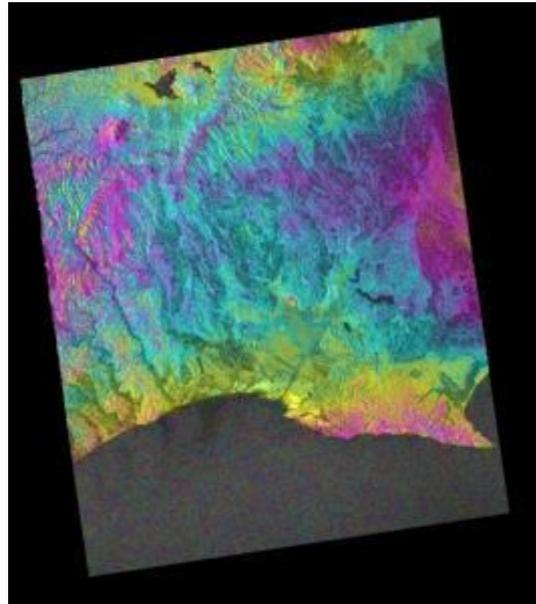


図 31 : 20080810\_20081226 の干渉画像  
Bperp.は 1310.60m, 期間は 138 日である.

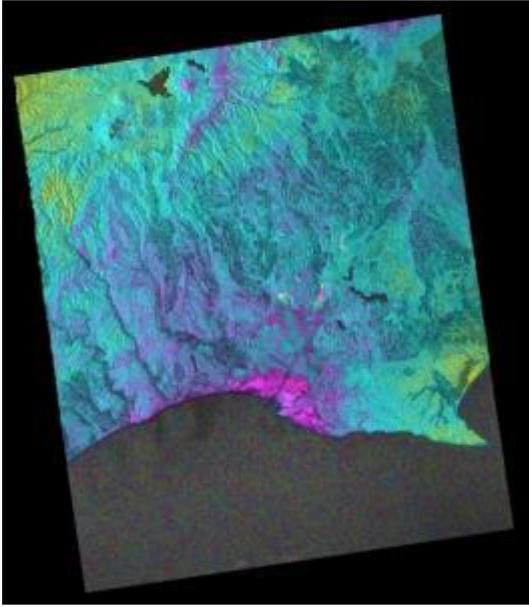


図 32 : 20080925\_20081226 の干渉画像  
Bperp.は 459.07m, 期間は 92 日である.

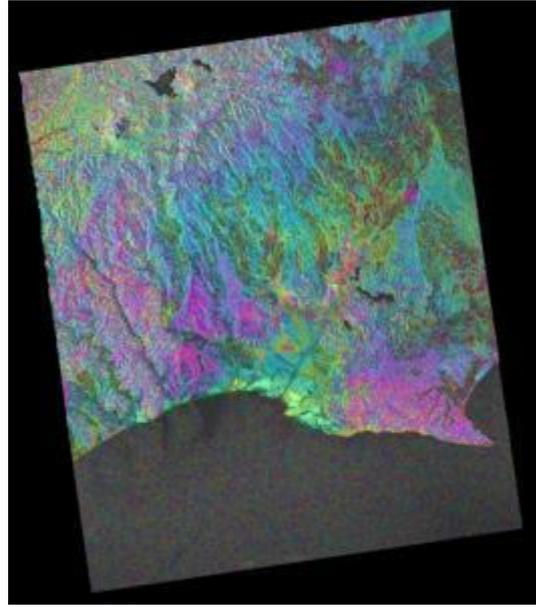


図 33 : 20080925\_20090210 の干渉画像  
Bperp.は 1178.46m, 期間は 138 日である.

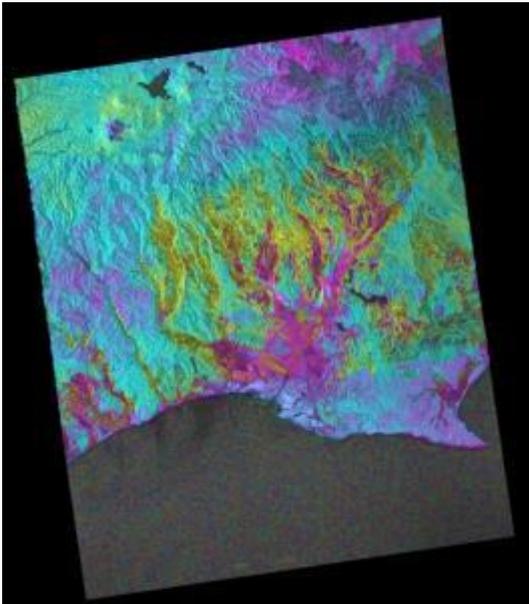


図 34 : 20081226\_20090210 の干渉画像.  
Bperp.は 719.34m, 期間は 46 日である.

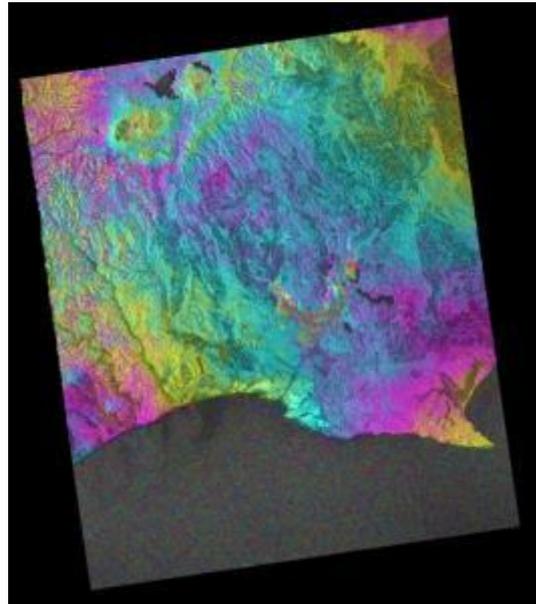


図 35 : 20081226\_20090628 の干渉画像  
Bperp.は 1490.78m, 期間は 184 日である.

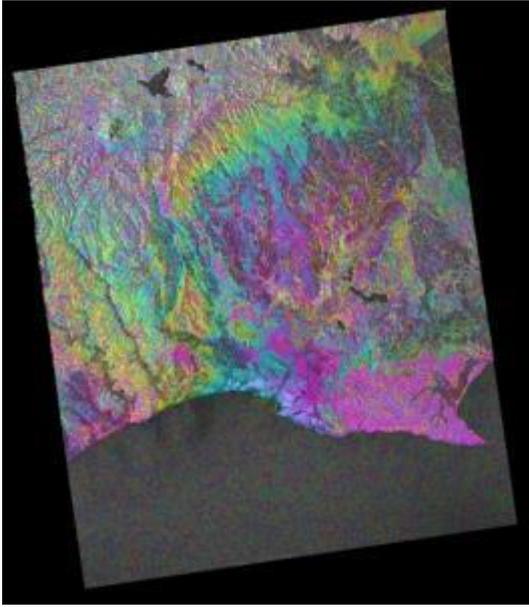


図 36 : 20090210\_20090628 の干渉画像  
Bperp.は 771.37m, 期間は 138 日である.

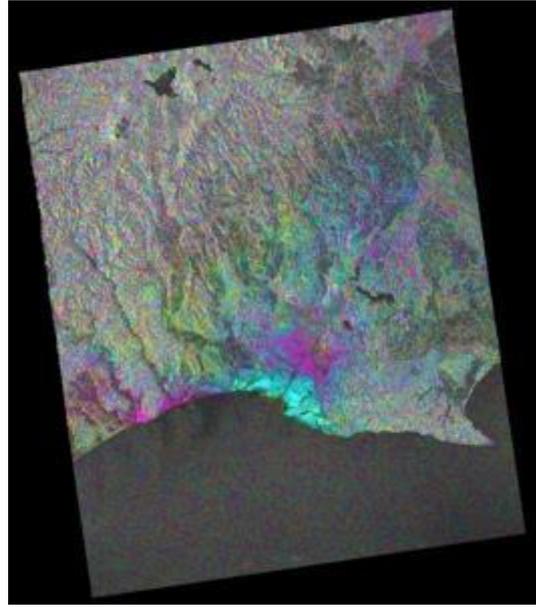


図 37 : 20090210\_20090813 の干渉画像  
Bperp.は 709.17m, 期間は 184 日である.

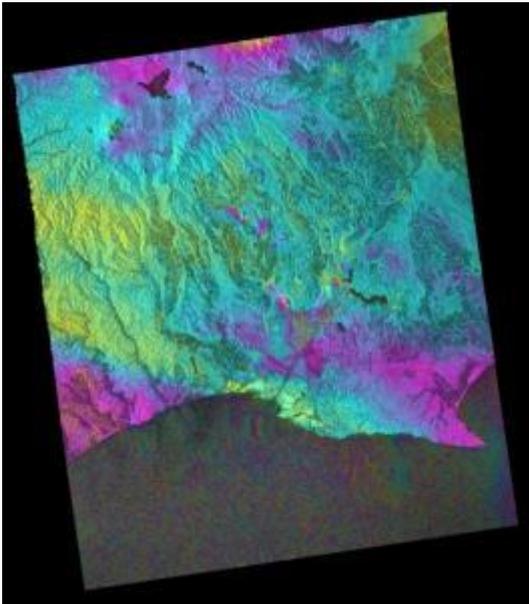


図 38 : 20090628\_20090813 の干渉画像  
Bperp.は 62.19m, 期間は 46 日である.

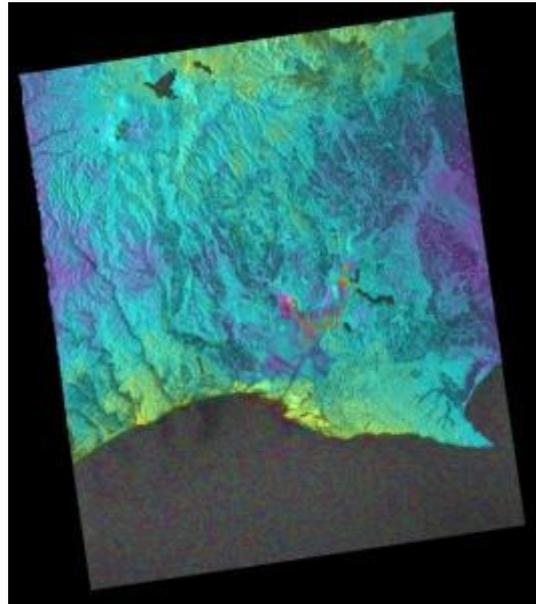


図 39 : 20090628\_20090928 の干渉画像  
Bperp.は 463.40m, 期間は 92 日である.

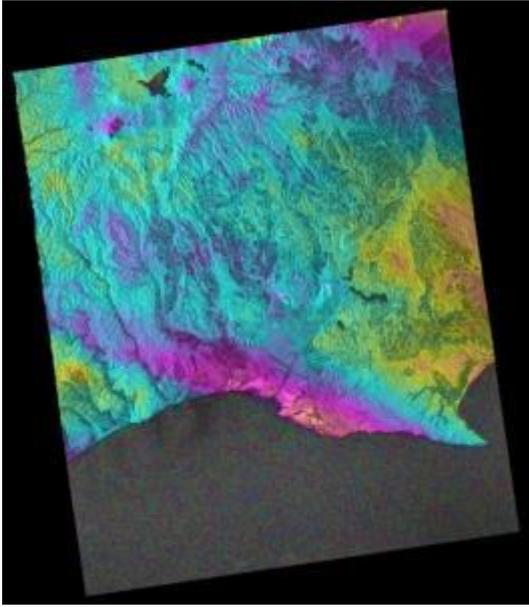


図 40 : 20090813\_20090928 の干渉画像  
Bperp.は 525.60m, 期間は 46 日である.

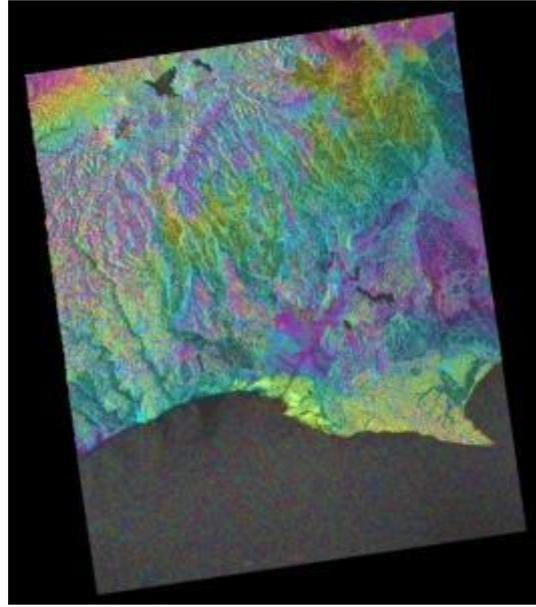


図 41 : 20090928\_20091229 の干渉画像  
Bperp.は 678.30m, 期間は 92 日である.

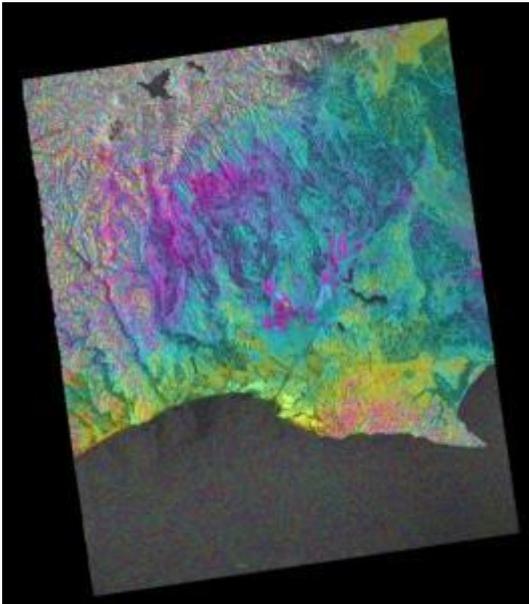


図 42 : 20090928\_20100516 の干渉画像  
Bperp.は 1712.61m, 期間は 230 日である.

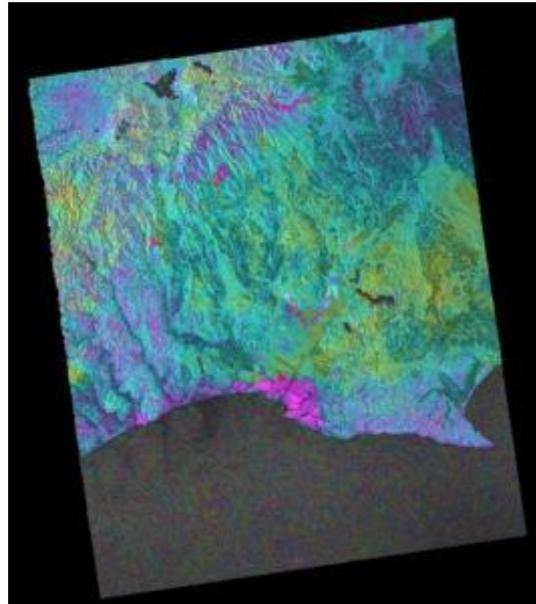


図 43 : 20091229\_20100516 の干渉画像  
Bperp.は 1034.15m, 期間は 138 日である.

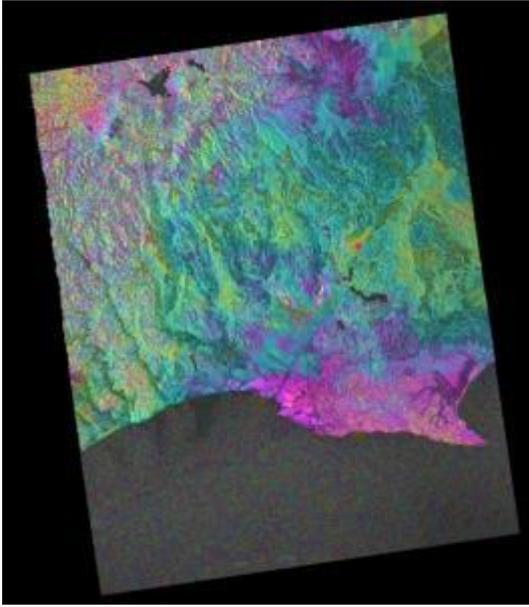


図 44 : 20091229\_20100816 の干渉画像  
Bperp.は 1532.09m, 期間は 230 日である.

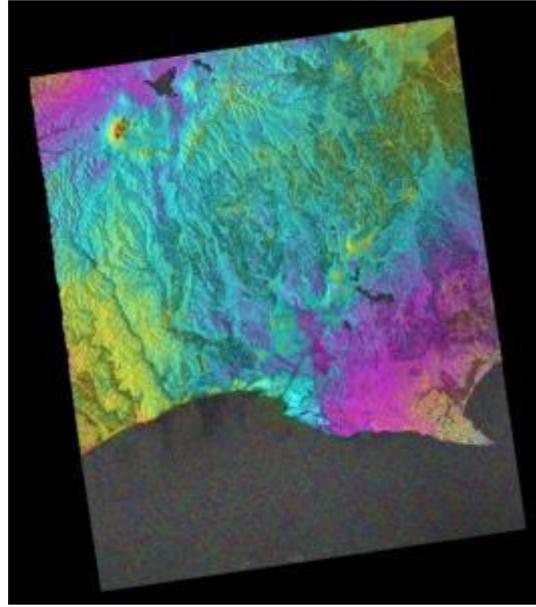


図 45 : 20100516\_20100701 の干渉画像  
Bperp.は 186.46m, 期間は 46 日である.

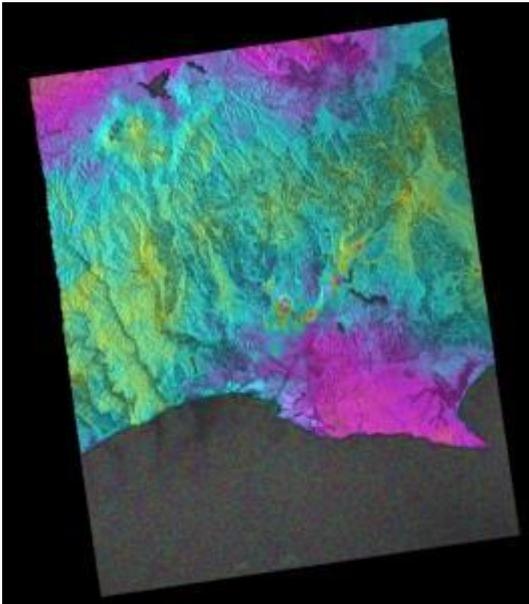


図 46 : 20100516\_20100816 の干渉画像  
Bperp.は 497.88m, 期間は 92 日である.

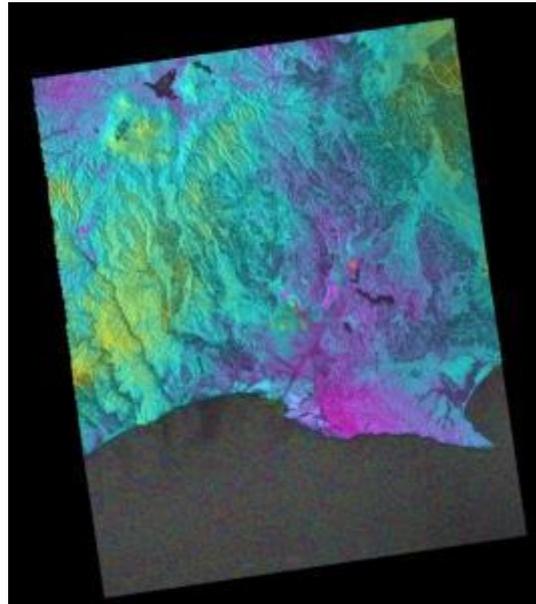


図 47 : 20100516\_20101001 の干渉画像  
Bperp.は 838.73m, 期間は 138 日である.

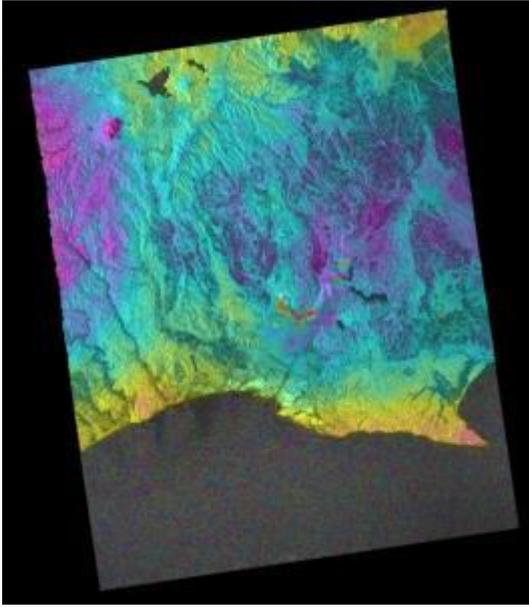


図 48 : 20100701\_20100816 の干渉画像  
Bperp.は 311.46m, 期間は 46 日である.

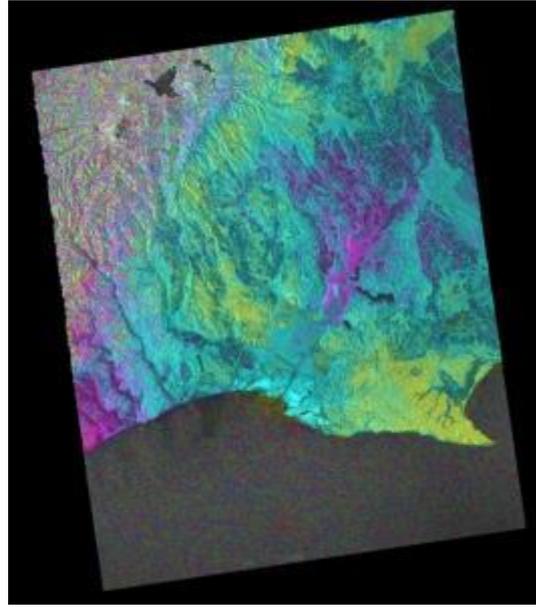


図 49 : 20100701\_20101001 の干渉画像  
Bperp.は 652.35m, 期間は 92 日である.

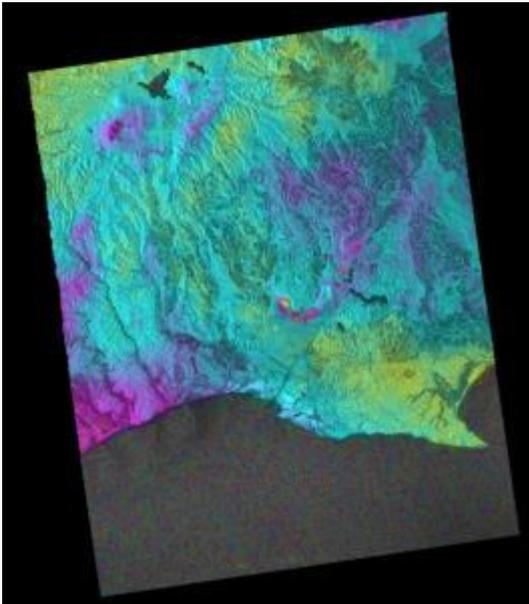


図 50 : 20100816\_20101001 の干渉画像  
Bperp.は 340.85m, 期間は 46 日である.

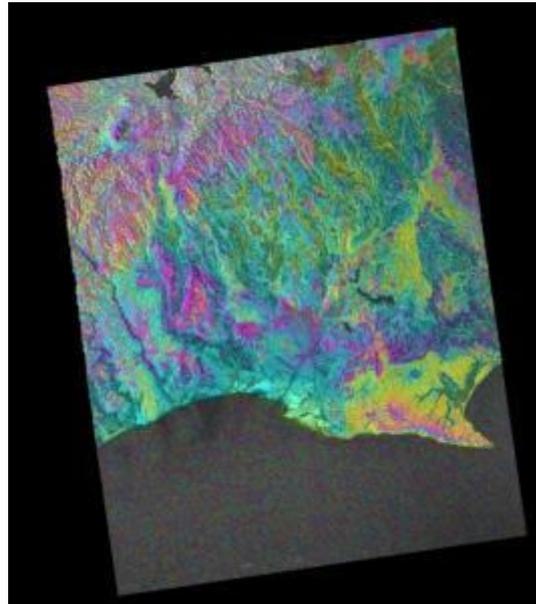


図 51 : 20101001\_20110101 の干渉画像  
Bperp.は 402.67m, 期間は 92 日である.

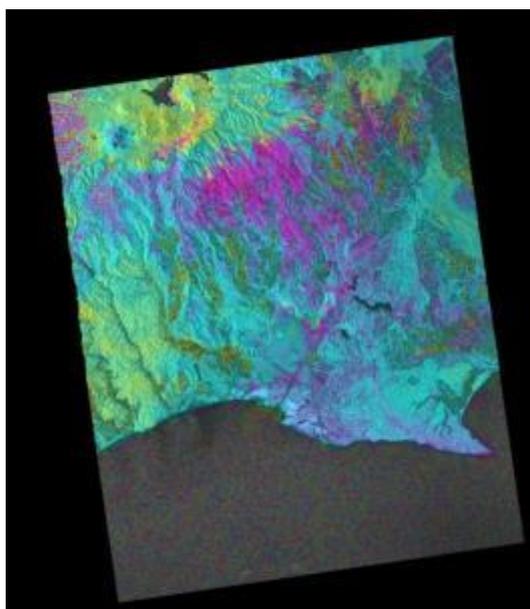


図 52 : 20110101\_20110216 の干渉画像.  
Bperp.は 773.95m, 期間は 46 日である.

積雪等の影響で全体的に干渉性が低い画像も見受けられるが, 図 46 や図 47, 図 48 ではシラルトロ湖付近や宮島岬, キラコタン岬付近において局所的な変動縞が存在している. また, 図 28 では湿原域の北部全体に変動が見られる. その一方, 図 32 や図 41, 図 43 等では釧路市街地の境界線に沿って変動が見て取れる. これらの変動の方向は一定ではなく, データの組により上昇方向と下降方向で異なっているものの, 独立な観測日のデータから同様の位置に変動が観測されていることから, 釧路平野における局所的な変動を表していると推定できる.

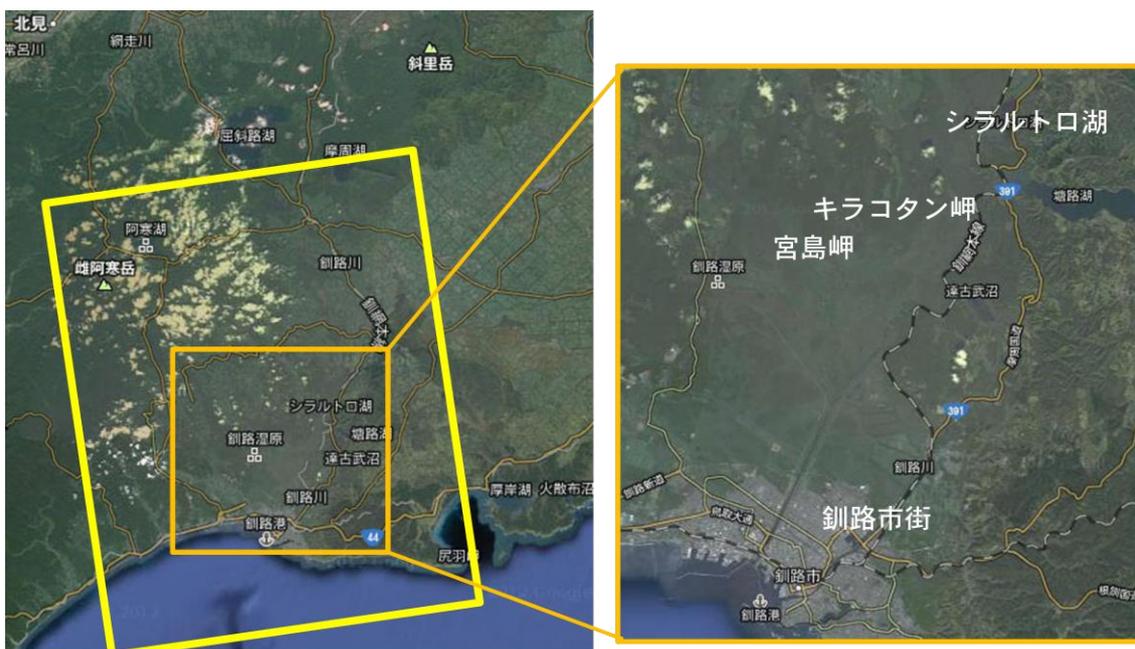


図 53：観測範囲の拡大図

黄線は干渉画像の全域を表す。右は橙線で囲まれた領域の拡大図である。

Google マップ (<https://maps.google.co.jp/>) より

### 3. 局所的変動の原因の考察

前節の干渉画像から読み取れた局所的変動について、それぞれの地点における変動量を以下に示す。ここで、変動の見られる地点を中心に $3 \times 3$ ピクセル程度を抜き出し、各ピクセルの変動量を平均化したものをその地点における変動量とした。また、一般に干渉画像には大気中の水蒸気等に起因するノイズが存在し、干渉画像から計算される変動量にはそれらノイズによる誤差が実際の変動量に加えられている。そこで、釧路平野周辺にある庶路、鶴居、標茶、遠矢、別保の5地点のうち変動観測地点と同様のノイズが見られる箇所を選んで変動量を算出し、変動観測地点の変動量から差し引いたものを最終的なその観測地点における変動量として考察した。上記5地点の市街地では基本的に大気ノイズに起因する変動量以外は観測されないと考えられるため、この作業を行うことで観測地点における大気ノイズの影響の補正を図ることができる。



図 54：庶路・鶴居・標茶・遠矢・別保の位置  
Google マップ (<https://maps.google.co.jp/>) より

### 3.1. 湿原北部

まず，釧路川の茅沼地区における変動量を以下に示す．なお，以下の降水量については気象庁のデータを使用している．



図 55：茅沼地区の観測点の位置

観測点の中心を×印で示している．Google マップ (<https://maps.google.co.jp/>) より

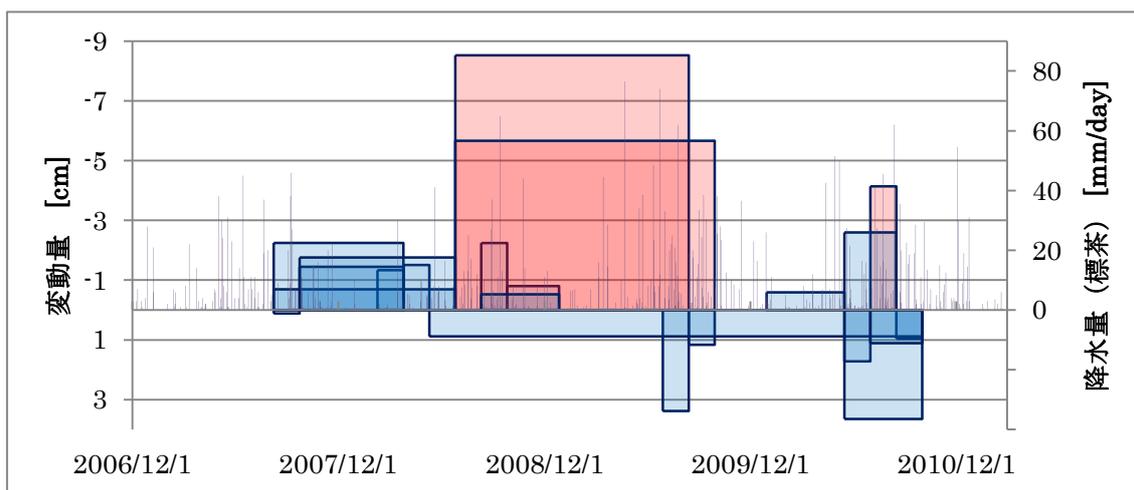


図 56：釧路川茅沼地区観測点における変動量

長方形の縦辺で変動量（左軸），横辺でデータの期間を表す．

変動量は負の値が上昇方向，正の値が下降方向である．

また，棒グラフは標茶における日降水量を表す．

図 56 を参照すると、茅沼地区においては最大で上昇方向に約 8.5cm 変化していることが分かる。ここで図内に赤色で表示した変動量の特に大きなデータを見ると、いずれも後の観測日付近には比較的多量の降雨が見られる。

次に、雪裡川の鉏路湿原流入部における変動量を以下に示す。

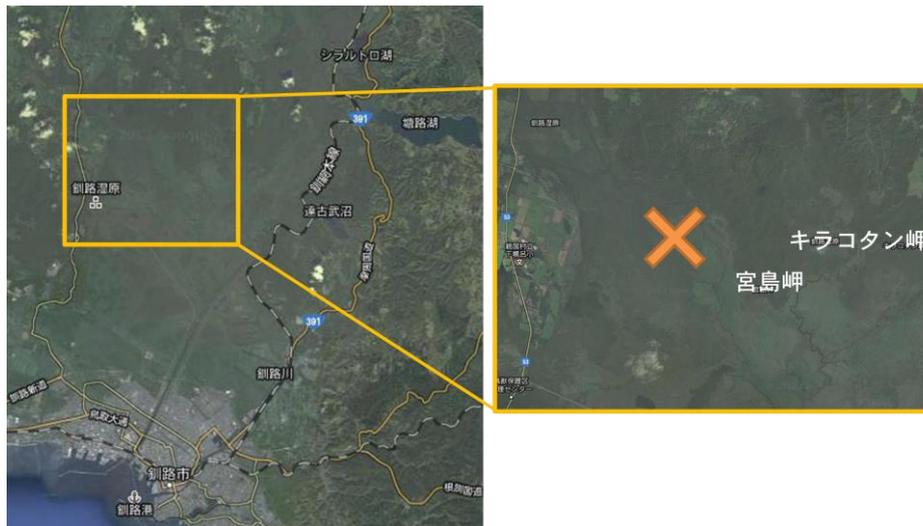


図 57：雪裡川の鉏路湿原流入部における観測点の位置  
観測点の中心を×印で示している。

Google マップ (<https://maps.google.co.jp/>) より

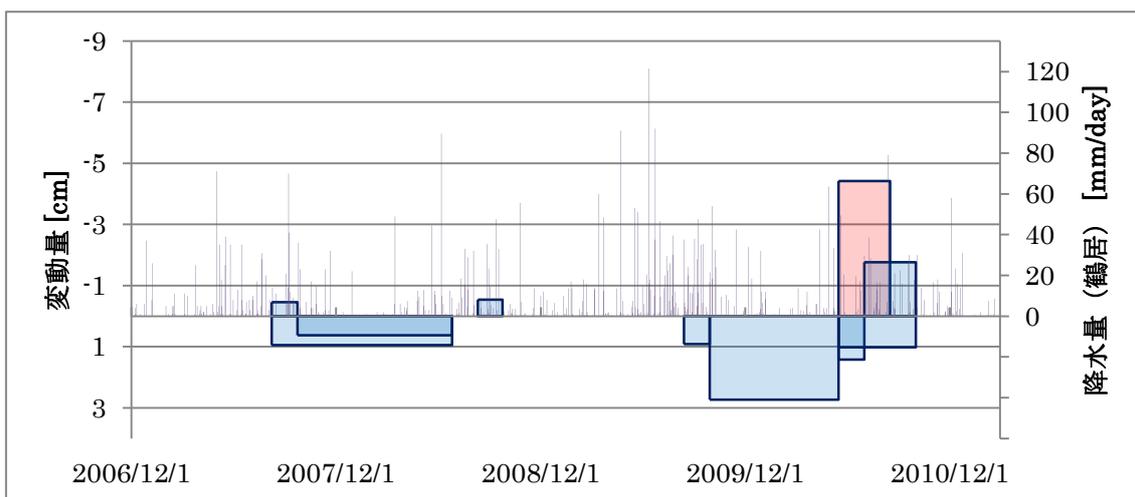


図 58：雪裡川湿原流入部における変動量

長方形の縦辺で変動量（左軸），横辺でデータの期間を表す。

変動量は負の値が上昇方向，正の値が下降方向である。

また，棒グラフは鶴居における日降水量を表す。

この観測点については位相アンラッピングの失敗が見られたデータが多く、茅沼地区におけるデータに比べて変動量のデータは少ないものの、赤く表示した部分については茅沼地区と同様に後の観測日付近に比較的多量の降雨が見られた。

以上より、湿原北部では多量の降水によって上昇方向に変動する傾向が見られた。湿原における冠水状況にもよるが、これらは湿原北部の水位の変化を反映していると考えられる。他方、釧路湿原の南部にあたる地域ではこのような大きな変動は観測されなかった。上記の2観測点はどちらも河川が釧路湿原に流入する地点にあたるため、両変動については河川が何らかの影響を与えていることが推測できるが、周囲の地下水位の状況や土壌の分布等も考慮して原因を考察してゆく必要がある。

### 3.2.釧路市街地

釧路市街地の変動量は以下のようなになった。なお、釧路市街については市街地に一様に変動が広がっているため、ここでは釧路市役所周辺で計算を行った。

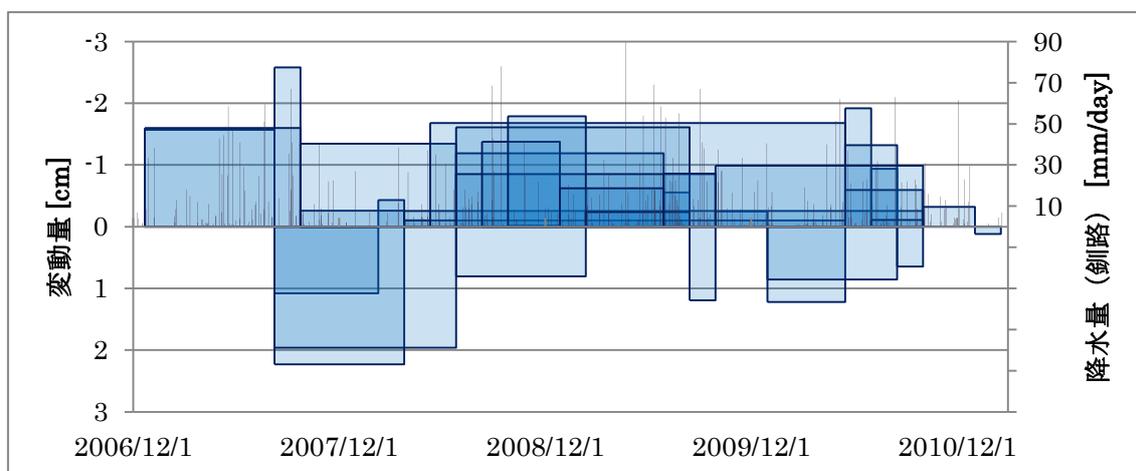


図 59：釧路市街地における変動量

長方形の縦辺で変動量（左軸）、横辺でデータの期間を表す。

変動量は負の値が上昇方向、正の値が下降方向である。

また、棒グラフは釧路における日降水量を表す。

ここでも釧路湿原北部と同様に市内降水量と共に変動量を示したが、降水量との対応は見られなかった。図 59 では短期間および長期間のデータが混在しているが、いずれも変動量は±2cm 前後にとどまっており、期間の長さによる差も見られない。また、時期により隆起方向と沈下方向の両方の変動が存在することから、地盤沈下のように経年的に沈下する

ような現象を意味しているものではないと考えられる。DEM やデータ処理上の問題ではないとすれば、何らかの要因によって市街地の変動が観測されたという可能性があるが、現在のところその要因については分かっていない。

#### 4. まとめ

InSAR を用いた観測によって、2006 年 12 月から 2011 年 2 月にかけての釧路平野における変動の様子を観測することができ、湿原北部の局所的な変動や釧路市街に沿った変動が存在していることが分かった。局所的な変動について個々に見ると、湿原北部にある釧路川の茅沼地区では最大で約 8.5cm、雪裡川の湿原流入部では約 4.4cm の上昇が見られた。上昇が特に大きなデータに関しては 2 回目の観測日付近で比較的多量の降水量があることから、降水による水位の変化が反映されていると考えられる。釧路市街地では±2cm 程度の変動が観測され、期間の長短による変動量の差は見られなかった。この原因としては潮汐変形や地下水のくみ上げによる影響、あるいはデータ処理上の問題等が考えられるが、現時点では分かっていない。

ただし、本研究では大気ノイズの影響の補正を試みているものの、算出された変動量は正確な値ではない。大気ノイズは数 cm の大きさに誤差を生じる場合もあるため、厳密に水位の上昇や下降の議論を行うためにはいかにノイズを除去するかが問題となる。現在においても大気ノイズの除去は InSAR 観測における重要な課題の一つであり、ノイズの除去方法の確立が今後の考察には必要である。また湿原内では場所や時期により冠水状況が異なり、面的な水位変動を観測するには地下水位の分布状況等も含めて考察してゆくことが重要である。

## 5. 謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々にご協力をいただきました。この場を借りて謝意を表したいと思います。

指導教官である古屋先生には、研究に必要なデータの用意に始まり、研究方針の相談や発表物の添削に至るまで、最初から最後まで面倒を見て戴きました。また、資料の見方や作り方、見せ方に関することも教わりました。研究の進め方も何も分からない状態でしたが、本研究を通して数多くのことを学ぶことができました。そして同研究室の日置先生をはじめ、固体系ゼミの先生方にも発表の際には多くのご指摘やご指導をして戴きました。あらためて感謝申し上げます。

また、研究室の先輩方には人工衛星等の基本的な知識や画像の見方、発表物の書き方等、本当にたくさんのことを教えていただきました。特にデータの処理に関しては、何か問題が起こる度に時間を割いてアドバイスしていただきました。ありがとうございました。

そして同研究室の白幡君、中島さん、橋本さんにも感謝をしたいと思います。同じ学部4年生としてお互いに発表練習を行ったり、何かと相談に乗っていただいたりしたことで、充実した研究室生活を送ることができました。

なお、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、JAXA (宇宙航空研究開発機構) 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

- \* 古屋正人 (2006) : 地殻変動観測の新潮流 InSAR (測地学会誌第 52 巻第 4 号, 225-243)
- \* Shimon Wdowinski, Falk Amelung, Fernando Miralles-Wilhelm, Timothy H. Dixon, and Richard Carande (2004) : Space-based measurements of sheet-flow characteristics in the Everglades wetland, Florida (GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 31, L15503)
- \* 日本リモートセンシング学会 (2011) : 基礎からわかるリモートセンシング (理工図書, 255-288)
- \* 岡崎由夫 (2010) : 釧路叢書第 36 巻 根釧台地と釧路湿原の地質 (釧路市, 64-66)
- \* 釧路市地域史料室 (2008) : 新版 釧路湿原 (釧路市, 3)
- \* 環境省 : 釧路湿原自然再生プロジェクト / 湿原データセンター (<http://kushiro.env.gr.jp/saisei>)
- \* 国土交通省 : 水管理・国土保全局 (<http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/index.html>)
- \* 気象庁 (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- \* 国土地理院 : 干渉 SAR ホームページ (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>)
- \* 日本測地学会 : 測地学テキスト WEB 版 (<http://www.geod.jpn.org/web-text/index.html>)
- \* JAXA (<http://www.jaxa.jp/>)
- \* 釧路湿原国立公園連絡協議会 (<http://city.hokkai.or.jp/~kkr946/>)
- \* Google マップ (<https://maps.google.co.jp/>)