東京大学地震研究所・研究集会「SAR・赤外センサによる地震・火山・地殻変動の監視・解析」(2008-W-02)2008年9月16日

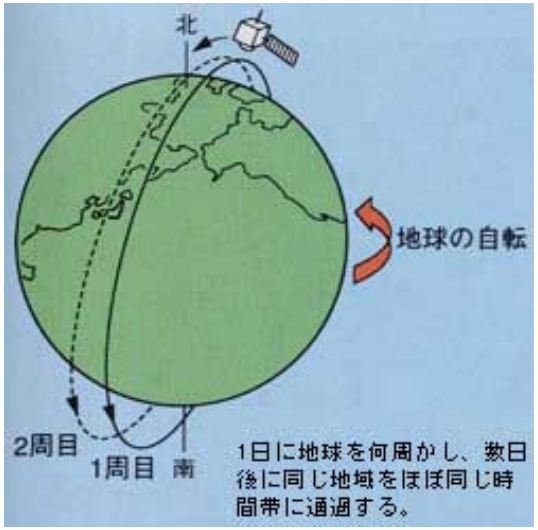
InSAR研究を振り返る
ー干渉性と測地学的精度ー

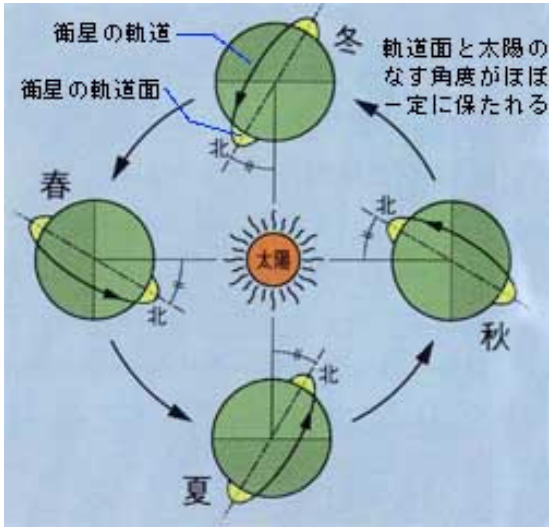
小林茂樹
東海大学・産業工学部・環境保全学科

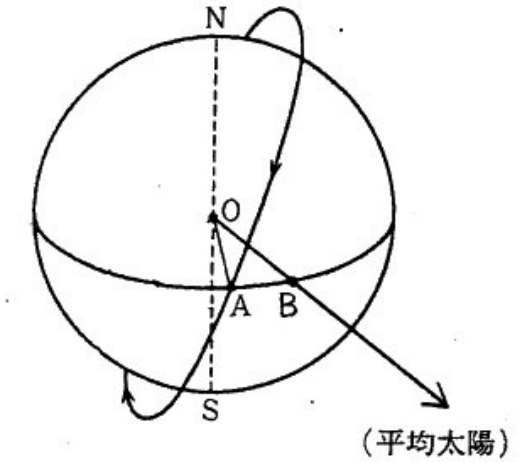
・初心者のために、干渉SARの基本原理・データ解析の実際について、(難しい数式を使わずに)易しく解説したい。

・ALOS衛星の軌道(太陽同期準**回帰**軌道)
・SARシステム(観測量と分解能)
・干渉SARとは?(後方散乱波の「位相」と「**位相差**」、リフレクター実験)
・干渉する条件(波長、基線長、入射角の効果)
・干渉縞の持つ情報(地形縞の補正)
・干渉処理のノウハウ(**軌道の精密推定**)
・マイクロ波の**大気伝搬遅延**(山岳波の実例)

地球観測衛星の軌道（太陽同期・準回帰軌道）







10:30観測なら∠AOB=約24度
90度ならDawn Dusk　軌道

軌道面の回転（昇交点赤緯の移動率:（度／日）） $\dot{\Omega}$

$$\dot{\Omega} = -9.964\left(\frac{R}{R+h}\right)^{3.5}\frac{\cos i}{\left(1-e^2\right)^2} \quad (=0.9856(\text{度/日}))$$

R: 地球半径、e:軌道の離心率

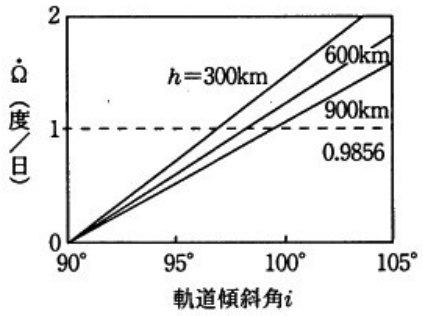


図 8.4　軌道面の変化

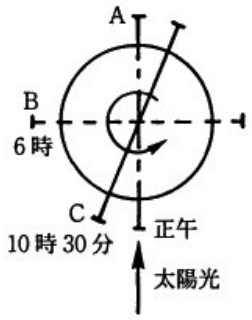
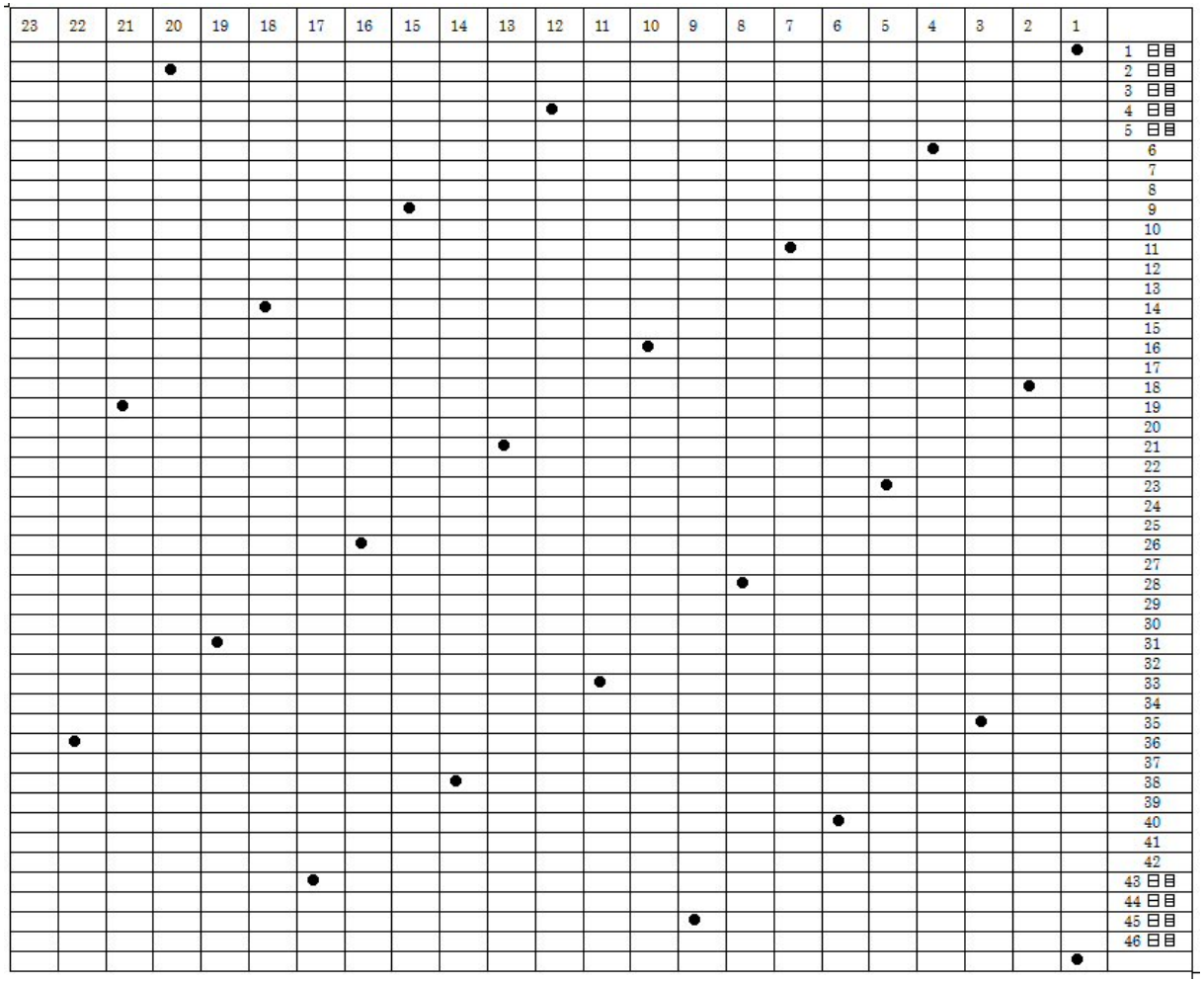


図 8.5　太陽光ベクトルと軌道の関係

ALOSの軌道
h: 軌道高度　約690km
i : 軌道傾斜角　約98度
　軌道周期　約99分
　回帰日数　46日

地球観測衛星の軌道（太陽同期・準回帰軌道）



ALOSの軌道
h: 軌道高度　約690km
i : 軌道傾斜角　約98度
　軌道周期　約99分
　回帰日数　46日

地球の自転により、1週するごとに、経度で約25度、西に移動する。

一日に地球を14週半。

翌日1週目（通算15週目）は、第1週目より西に19パスずれる。
これを繰り返して、46日、671パスで（極域を除く）全球を観測できる。

1パス西を観測するのは17日後、
1パス東を観測するのは29日後

周期98.7分×671パス＝24時間×60分×46日回帰

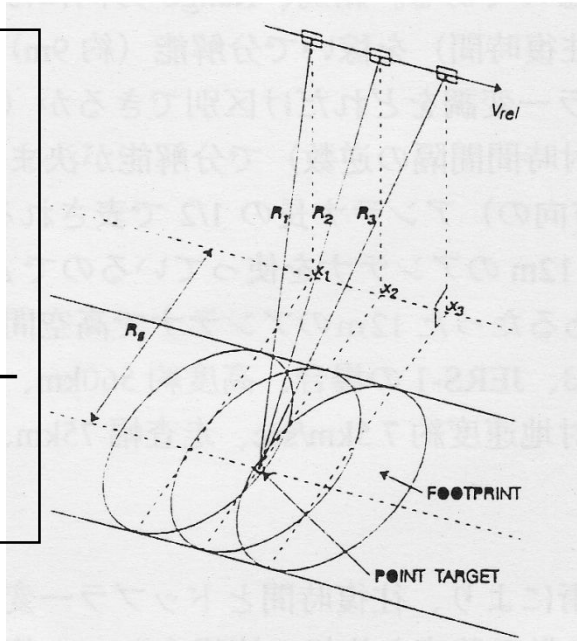
JERS-1の軌道
翌日、1パスだけ西にずれる

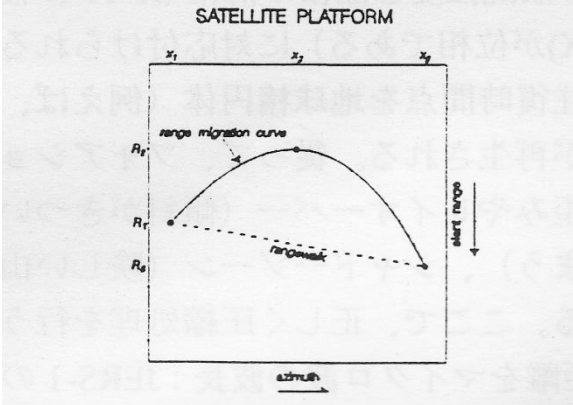
合成開口レーダー（SAR: Synthetic Aperture Radar）とは？

ALOS衛星（左下がPALSARセンサ：JAXAより）

太陽同期準回帰軌道
高度600-800km
回帰周期：24～46日

レーダーとは？
(Radio Detection and Ranging)
サイドルッキングレーダー
実開口レーダーでは
解像度不足
$\Delta = R\lambda/L$





人工衛星などが**移動**しながら、**コヒーレント**なマイクロ波パルスを（進行方向に対して）
横斜め下に照射し続け、
（各地表点から）それぞれ異なる**ドップラー変調した後方散乱波**（の時系列を）受信し続ける。
⇔ 仮想的な巨大アンテナ
アジマス方向（進行方向）、レンジ方向（照射方向）の2次元的に広がった信号を1点に圧縮することでレーダー画像が再生される。

あるターゲットからの信号は、レンジーアジマス画像内で双曲線の軌跡を描く

SARの観測量と画像再生

おおざっぱに言うと、

レンジ方向に　往復時間τを

アジマス方向に　ドップラーシフト量を計測することで、

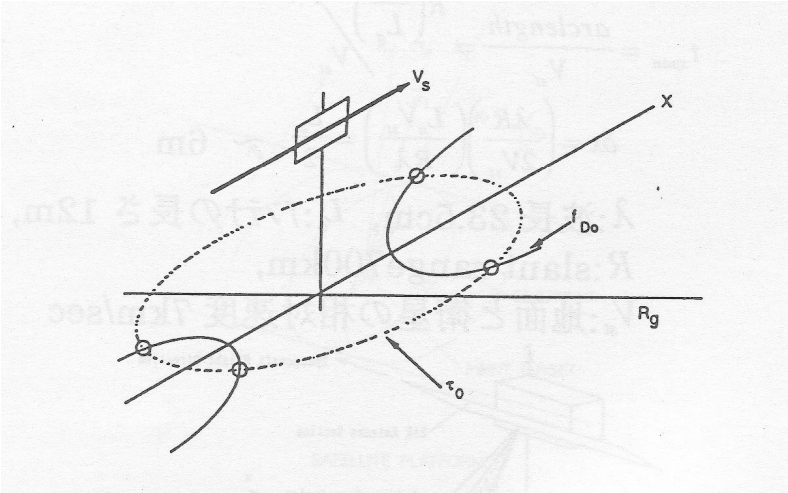
τからレンジ位置Rgが、fからアジマス位置Azが決まる。

もう少し正確に言うと、

（τ、f）座標から（Rg, Az）座標への変換：

$$\tau = \frac{2R}{c} = \frac{2}{c}\sqrt{Az^2 + Rg^2 + H^2}$$

$$f_D = \frac{2V_{st}Az}{\lambda R} = \frac{2V_{st}Az}{\lambda\sqrt{Az^2 + Rg^2 + H^2}}$$



τ一定の場所は（衛星直下点を中心とした）円となり、

f一定の場所は双曲線となる。両者の交点から位置（Rg, Az）が決まる。

※　画像の投影面は、地球楕円体（GRS80など）。

SARの分解能

レンジ分解能：パルス1個の長さ（が分離できるだけの距離）

$$\Delta Rg = \frac{c\tau}{2\sin\theta}$$ ～数m

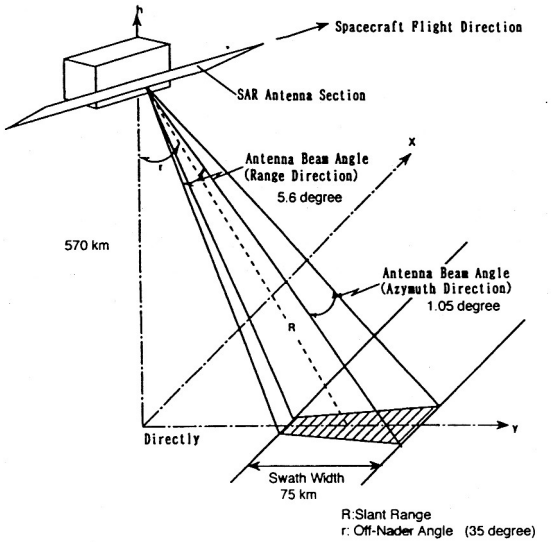
c：光速、τ：パルス幅～10^{-8}sec、θ：入射角（10-50度：干渉SARでは35度くらい）

アジマス分解能：各地点からの（衛星の運動、地球の自転による）ドップラーシフトを区別できる時間幅に相当する距離

ドップラーシフト量と相対速度の関係、周波数分解能と（各地点での）照射時間の関係を使うと、

$$\Delta Az = \frac{\lambda R}{2V}\delta f = \left(\frac{\lambda R}{2V}\right)\left(\frac{\mathrm{VL}}{\mathrm{R}\lambda}\right) = \frac{\mathrm{L}}{2}$$ ～数m

λ：波長、R：スラントレンジ、V：相対速度、L：アンテナの長さ



つまり、

レンジ分解能はパルス幅で決まり、
アジマス分解能はアンテナの長さで決まる
（衛星の高度やマイクロ波の波長とは無関係）

高解像度SARデータの1ピクセルは数m四方の大きさ

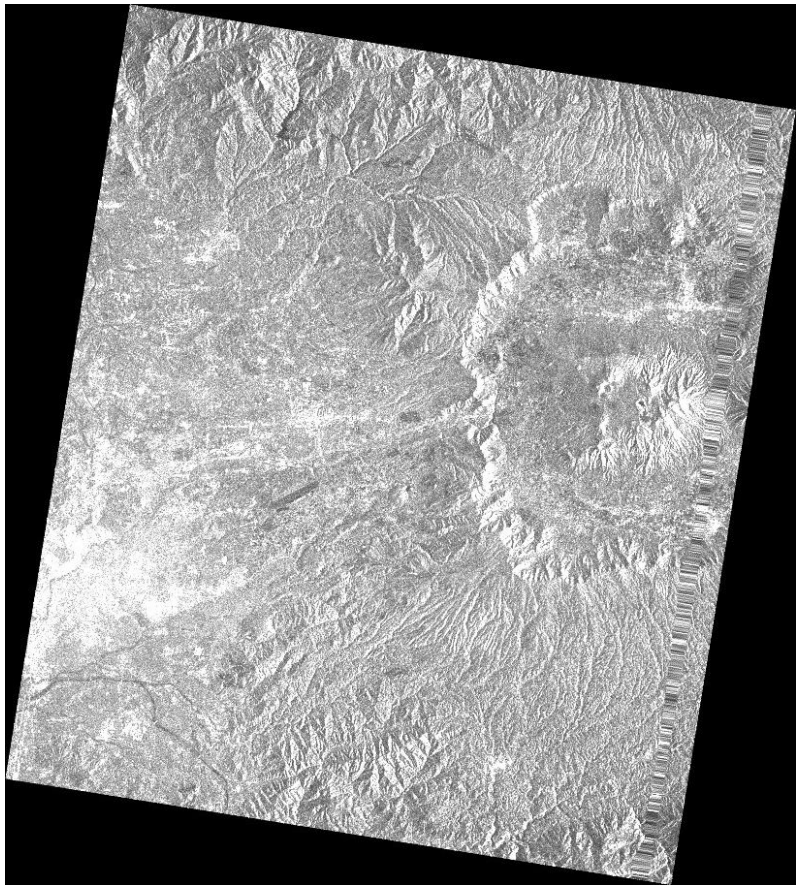
SARの振幅（強度）と位相

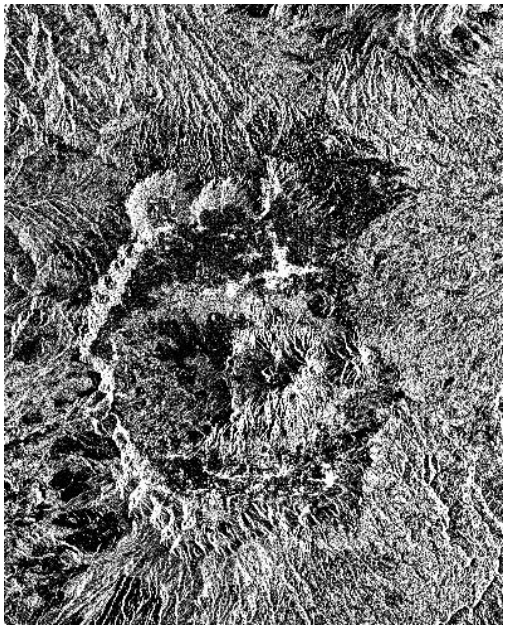
観測しているのは往復時間とドップラーシフトと言ったが、データとしては、

後方散乱波の振幅と位相 で表される。（偏波の情報もある。）

複素数データ X+iY ：　　振幅：$(X^2+Y^2)^{-1/2}$ 、 位相：$\Phi=\tan^{-1}(Y/X)$

後方散乱強度は、入射角・ラフネス、誘電率に依存する。





SAR強度画像：波長の違い
左：RADARSAT（λ＝5.6cm；Cバンド）
右：JERS-1（λ＝23.5cm、Lバンド）
波長が短いほど植生変化などに敏感
波長が長い方が干渉しやすい。

SARの位相とは？

SARデータの1ピクセルが持つ情報

　1ピクセル数m四方内に散らばった多数の散乱体からの後方散乱波の情報を足したもの（複素平面内で　Σ(Xj + i Yj) ）。

位相とは？

　（コヒーレントな）波の振動の位置

※送信波と受信波を（時間軸上で）相関処理することで各点の位相を正確に求める。

　→衛星から各地表点までの距離（視線距離）を波長を単位にして測ったもの。

　＝ **「視線距離を波長で割った余り」 (1波長23.5cm分が2π　radian)**

　　位相値の範囲は[－π～＋π]

しかし、凸凹した地表面上のある地点の位相の値は、隣りの画素とはほとんど無関係（ランダムな空間分布）。

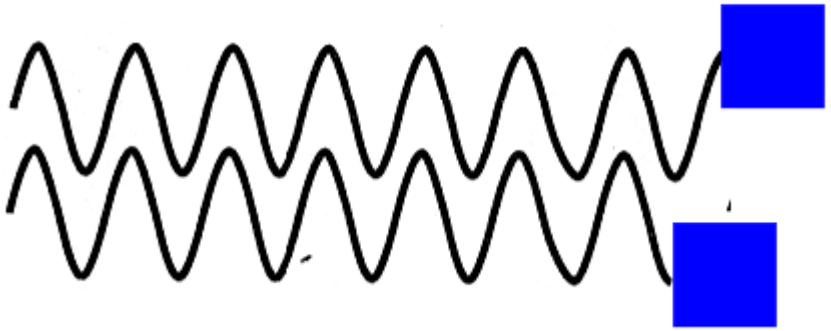
位相差の重要性

重要なのは **位相差**

★厳密に同じ位置から2枚のSAR画像を取得すれば、すべての対応する画素の位相差は0になるはず。

2度の観測の間に地面が衛星に対して動いていれば、位相差の変化を画像化できる。

上図と下図とでは、距離が
1/2λだけ変化しているので、
位相差πの変化が生じる。
（SARでは往復距離を測るので）



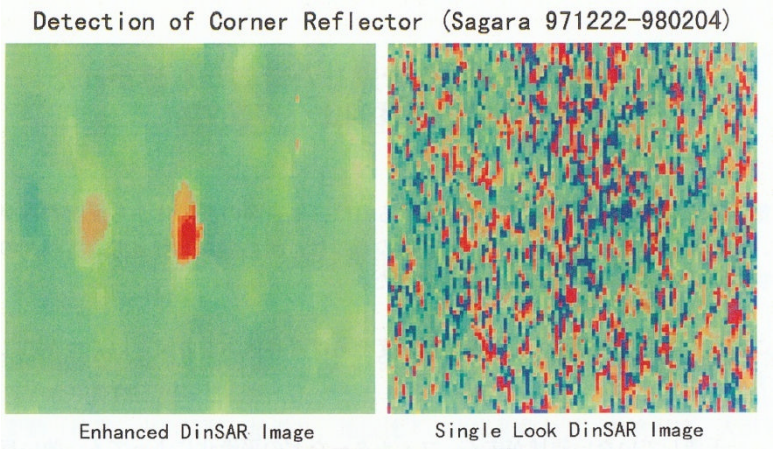
位相差2πの変化は、
視線距離1/2λの変化に相当する。
（位相差2πの変化を縞々カラーバーで表す。）

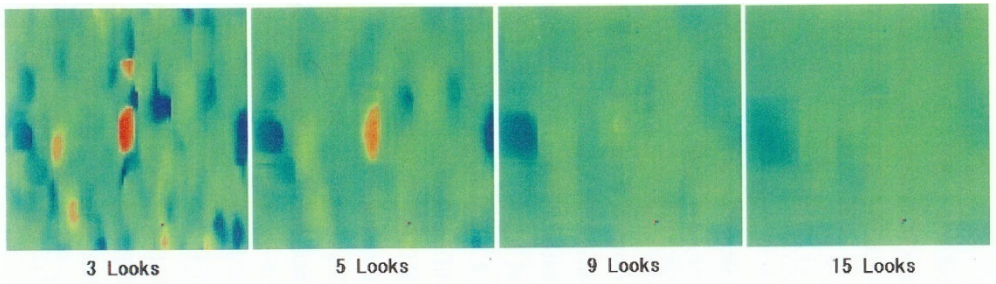
－π
（λ/2=5.8cm近づく）

0

＋π
（5.8cm遠ざかる）

固定式コーナーリフレクターを用いた位相校正実験





±3.3radianの人為的移動に対して、
±2.5radianの計測結果
（CR以外の背景からの散乱の混入）

平滑化の効果

SARの1ピクセルは数mサイズでも
干渉画像の解像度は数ピクセル程度
（コヒーレンスを考慮した平均化）

干渉SAR（SAR Interferometry）とは？

実際にはいくらかずれた位置から取得した2枚のSAR画像から、同一地表点の位相差を正確に求めること。　＜衛星画像のマッチングと幾何補正が必要＞

⇒　衛星から各地表点までの視線距離の変化　を
面的に求める技術（*Massonnet et al., 1993*など）

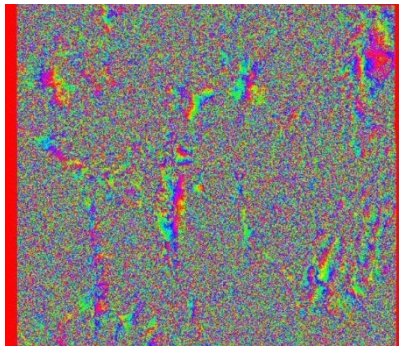
ただし、「干渉する」ことが不可欠！

「干渉する」とは？　＝　位相差の値が空間的に滑らかに分布すること。
－π～＋πの値をもつ位相差の値が隣同士で、±π以上飛ばないこと。

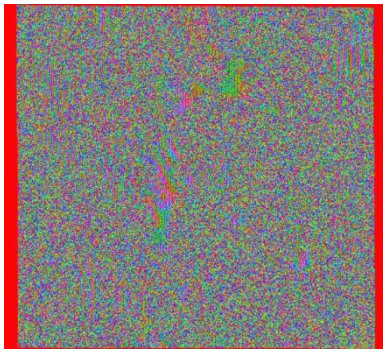
●干渉を妨げる要因：
Temporal Decorrelation：2つのデータ取得間隔が長いと、（風化、植生変化、人為的改変などで）地表の反射特性が変わってしまう。
Baseline Decorrelation：2度観測時の衛星の位置が離れている（基線長が長い）と、後方散乱波の相関が低くなり、隣り画素との位相差の連続性が失われる。

波長の効果：Lバンド（波長23.5cm）は、Cバンド（5.6cm）比べて、植生変化などに鈍感なため、基線が長くてもよく干渉する。傾斜地でもよく干渉する。

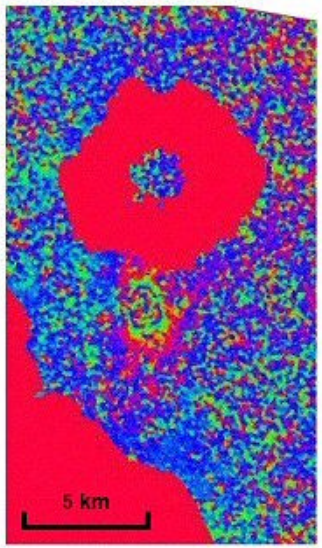
波長と干渉性



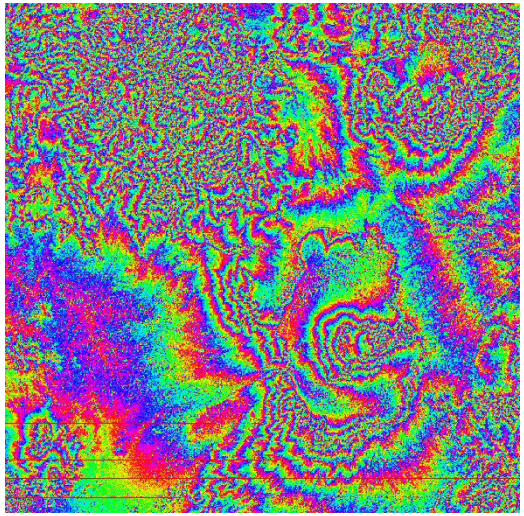
0506-0512 Bp=220m



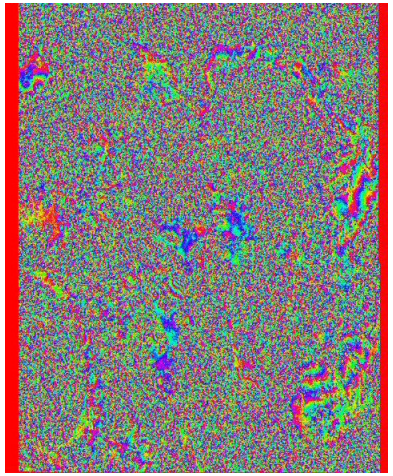
0512-0603 Bp=70m



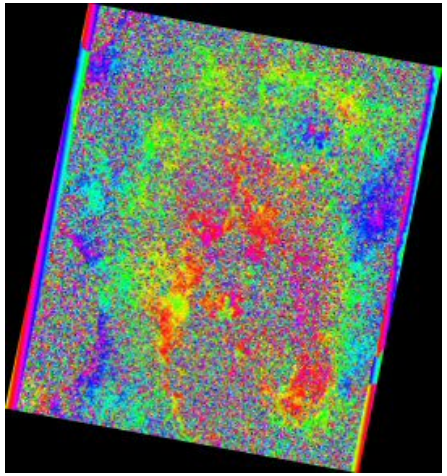
1992/10/15-1998/05/01
Bp=50m JERS-1 有珠山



2007/01/07-2008/01/10
Bp=365m ALOS 阿蘇

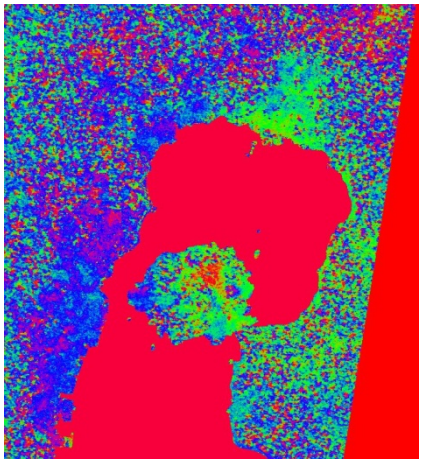


0502-0506 Bp=380m



0502-0602 Bp=1m

ENVISAT（Cバンド）



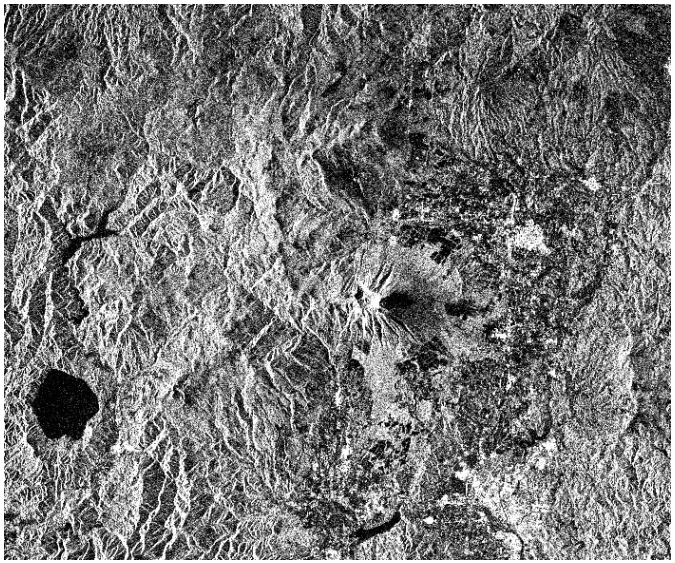
1993/10/17-1998/08/12
Bp=50m JERS-1 桜島

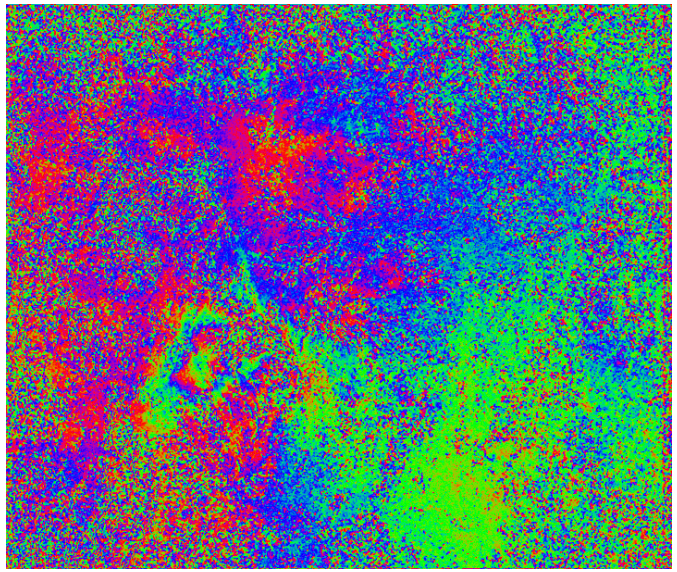
地殻変動の検出には
Lバンドが圧倒的に有利！

Lバンド（波長23.5cm）は、
Cバンド（5.6cm）比べて、
植生変化などに鈍感；
基線が長くてもよく干渉する；
時間間隔長くてもよく干渉する；
傾斜地・山岳地でも干渉する。

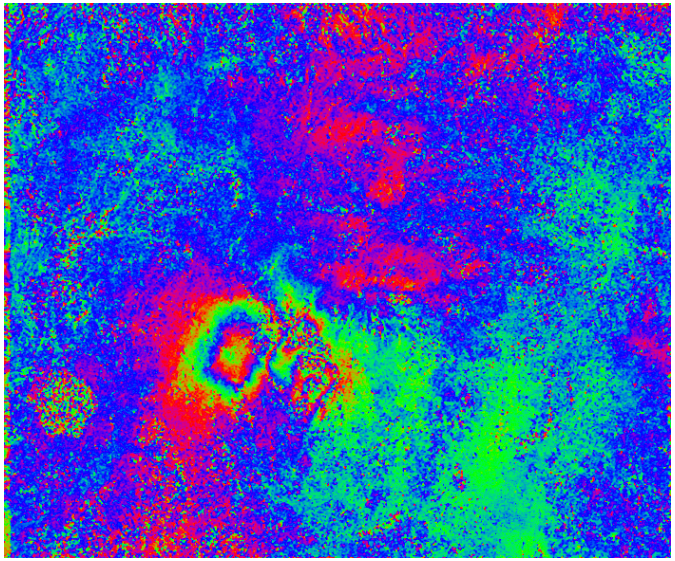
基線長と干渉性

岩手県内陸北部地震（1998年9月3日
M=6.1）による地殻変動(JERS-1)





980711-981007　Bp=1240m

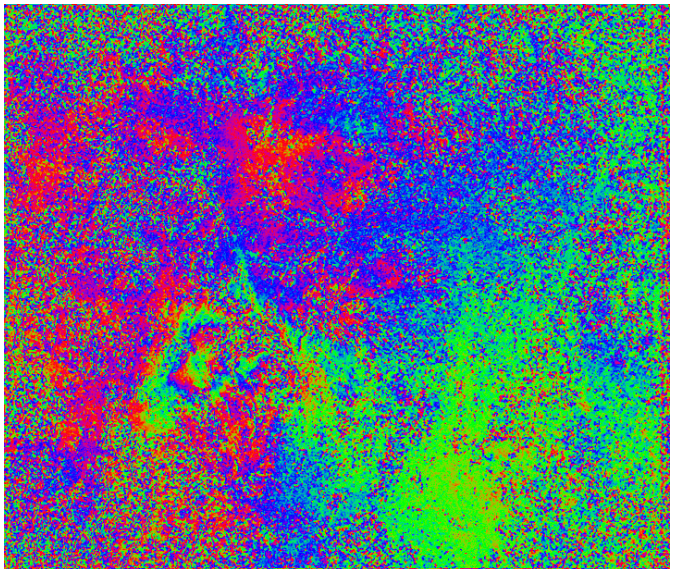


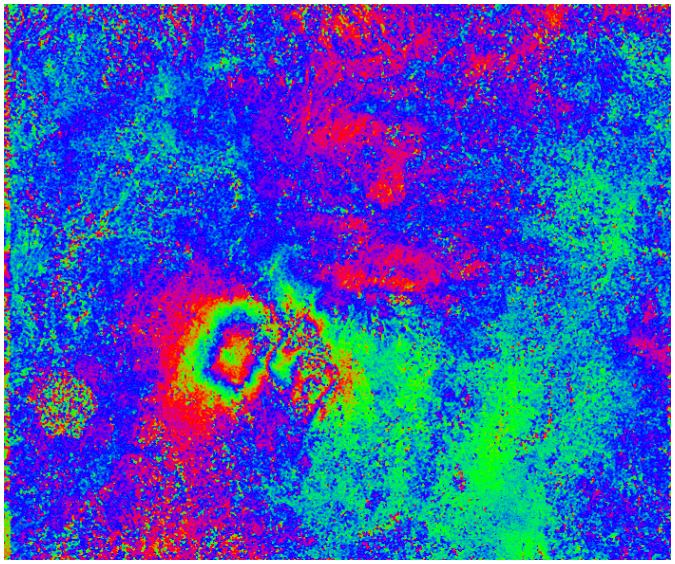
980824-981007　Bp=333m

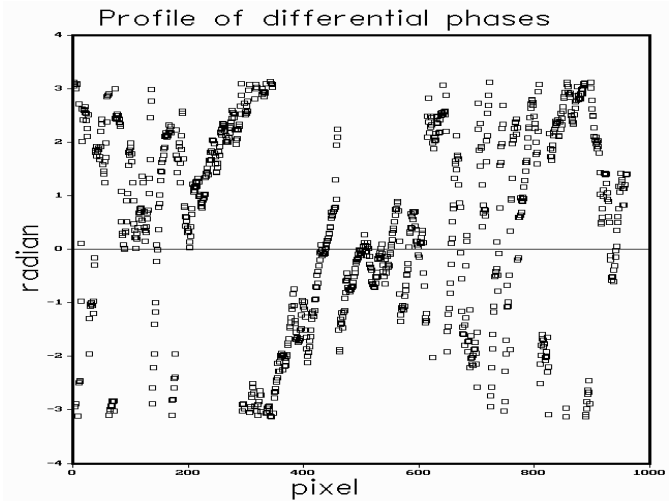
※水面は干渉しない

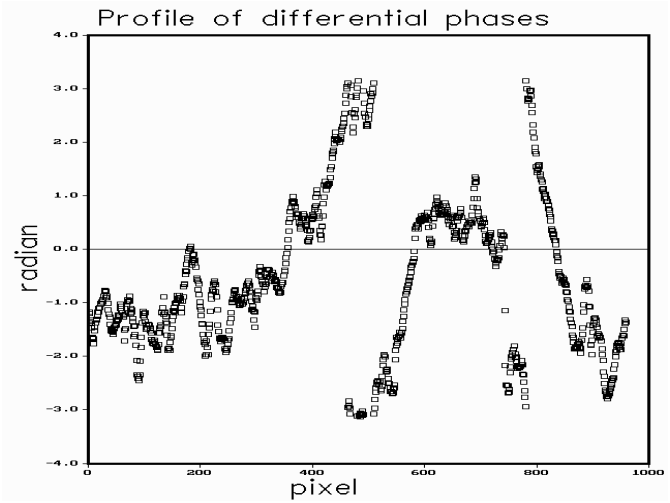
基線長と干渉性

岩手県内陸北部地震（1998年9月3日 M=6.1）による地殻変動(JERS-1)









980711-981007　Bp=1240m

980824-981007　Bp=333m

干渉性の限界

基線長が長くなると
⇒地表を見る角度差が大きくなり、
⇒隣り合う画素で位相差の差が±πを超えやすくなり、
干渉しなくなる。

波長が長いほど、
スラントレンジが長いほど、
分解能が小さいほど、
入射角が大きいほど
臨界基線長Bcrは長くなり、干渉しやすい。

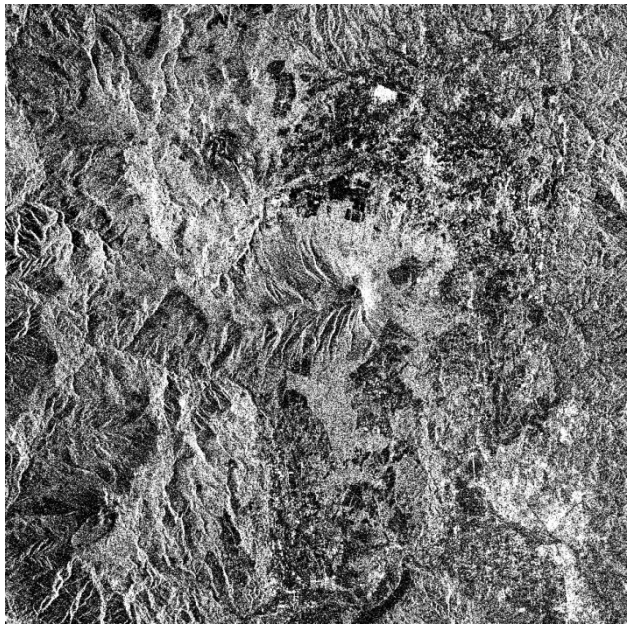
臨界基線長：**Bcr**

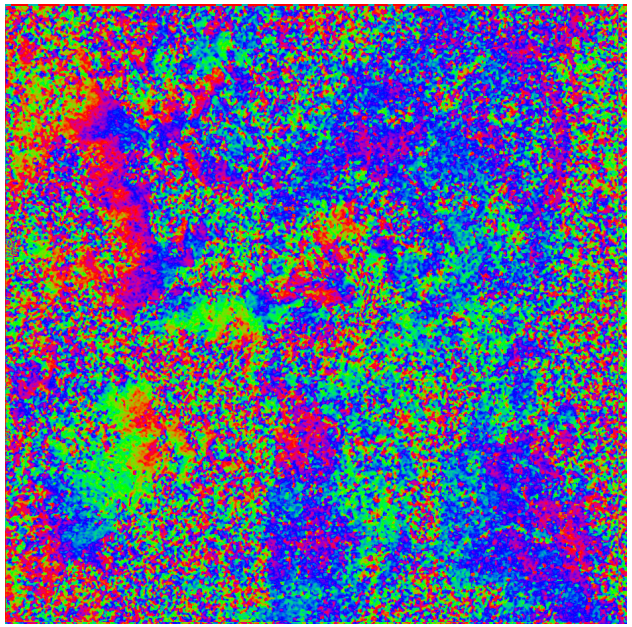
ENVISAT	約 1 km
JERS-1	約 7 km
ALOS(FBS 34.3度)	約15 km

ただし、Farレンジ側斜面では、地表に沿ったフリンジレートがdφ/dxが小さくなり干渉しやすい。

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{2Bp\cos\theta}{\lambda R}$$

※入射角θの斜面に沿った位相差φの変化率



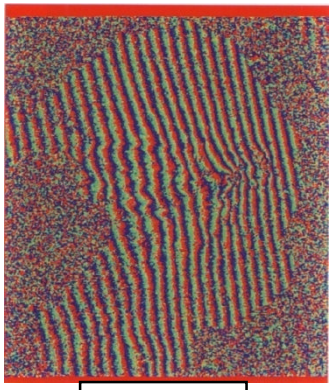


980727-980909 Bp=1940m

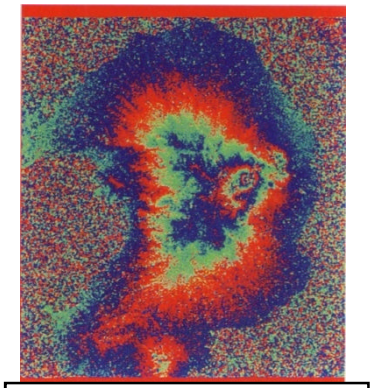
干渉している位相差（＝干渉縞）の持つ情報

（1）地球楕円体に沿った位相差（軌道縞）
（2）地形の凹凸による位相差（地形縞）
（3）マイクロ波の大気伝播遅延による位相変化の差
（4）視線方向の地殻変動による位相差

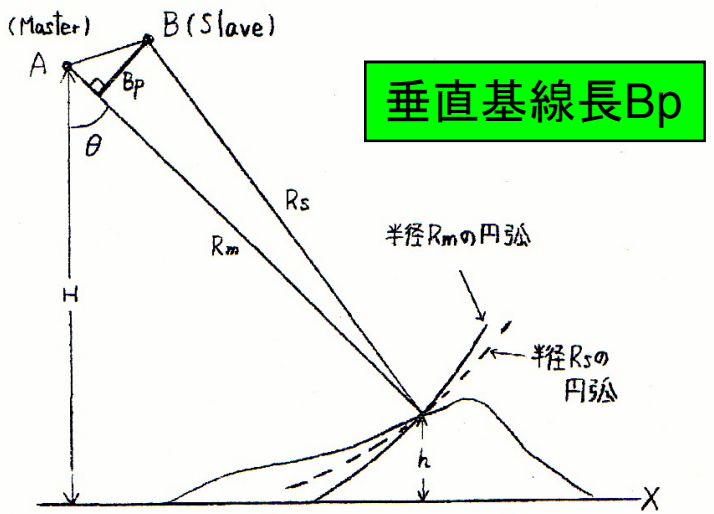
$$位相差\phi = 4\pi \frac{Rs - Rm}{\lambda}$$



軌道縞



地形縞：Bp=70m,
dh/dφ=720m



垂直基線長Bp

Rm, Rs:スラントレンジ

位相差2πの変化＝視線距離1/2λ=12cmの変化
＊　位相差2πを虹色のカラーバーで表す。

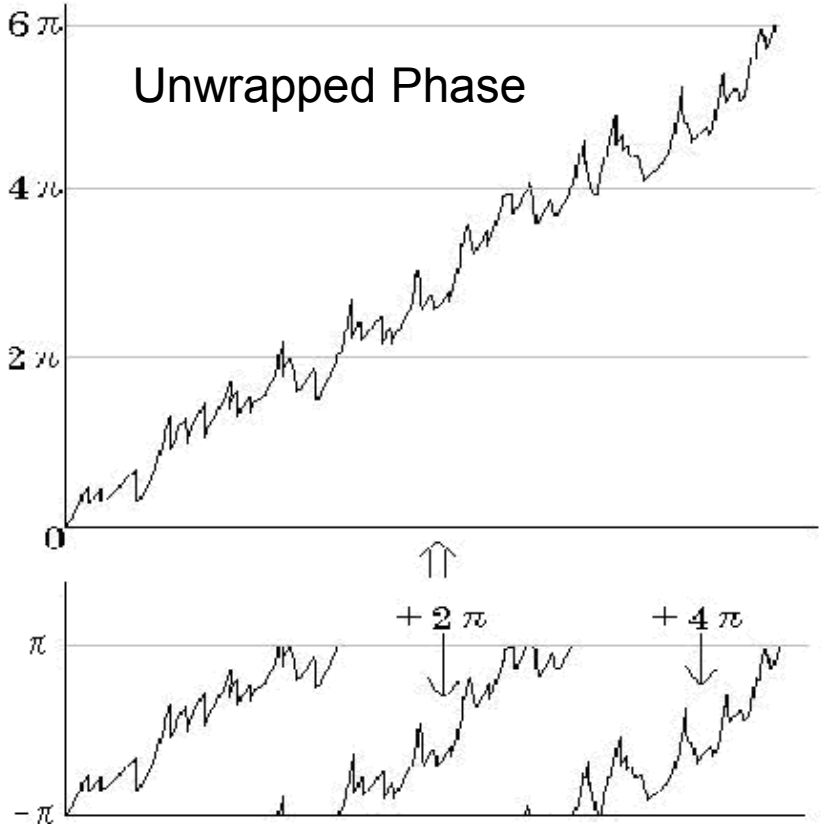
地形縞変化率（標高m／2π）　$:\frac{dh}{d\phi} = \frac{\lambda R \sin\theta}{2Bp}$

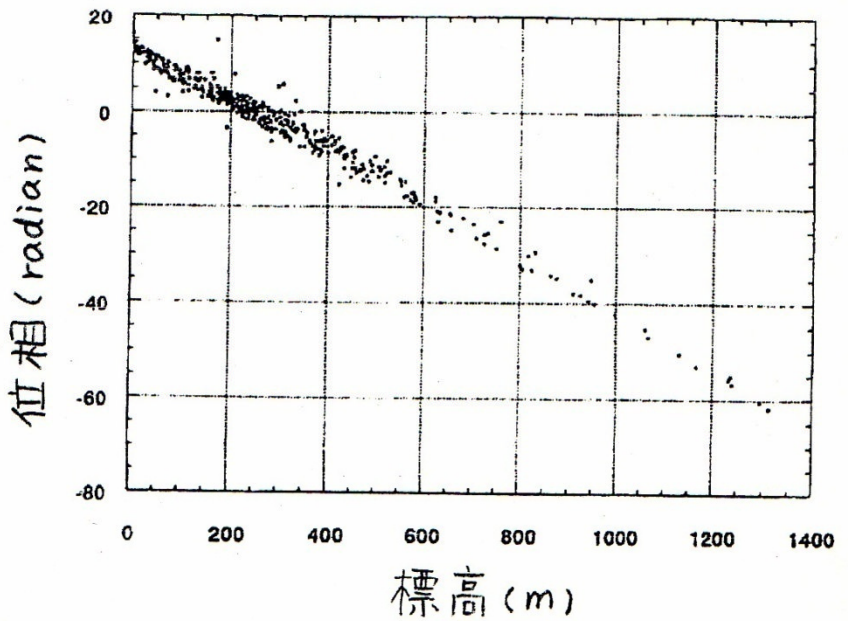
Bp(m)	50	100	500	1000
dh/dφ (m/2π)	1000	500	100	50

(JERS-1の場合)

地形縞変化率は垂直基線長に依存する。
Bp=100mならば
　標高の誤差5m＝地形縞の位相誤差2π/100 rad
　　～12cm/100 = 1mmの視線距離変化

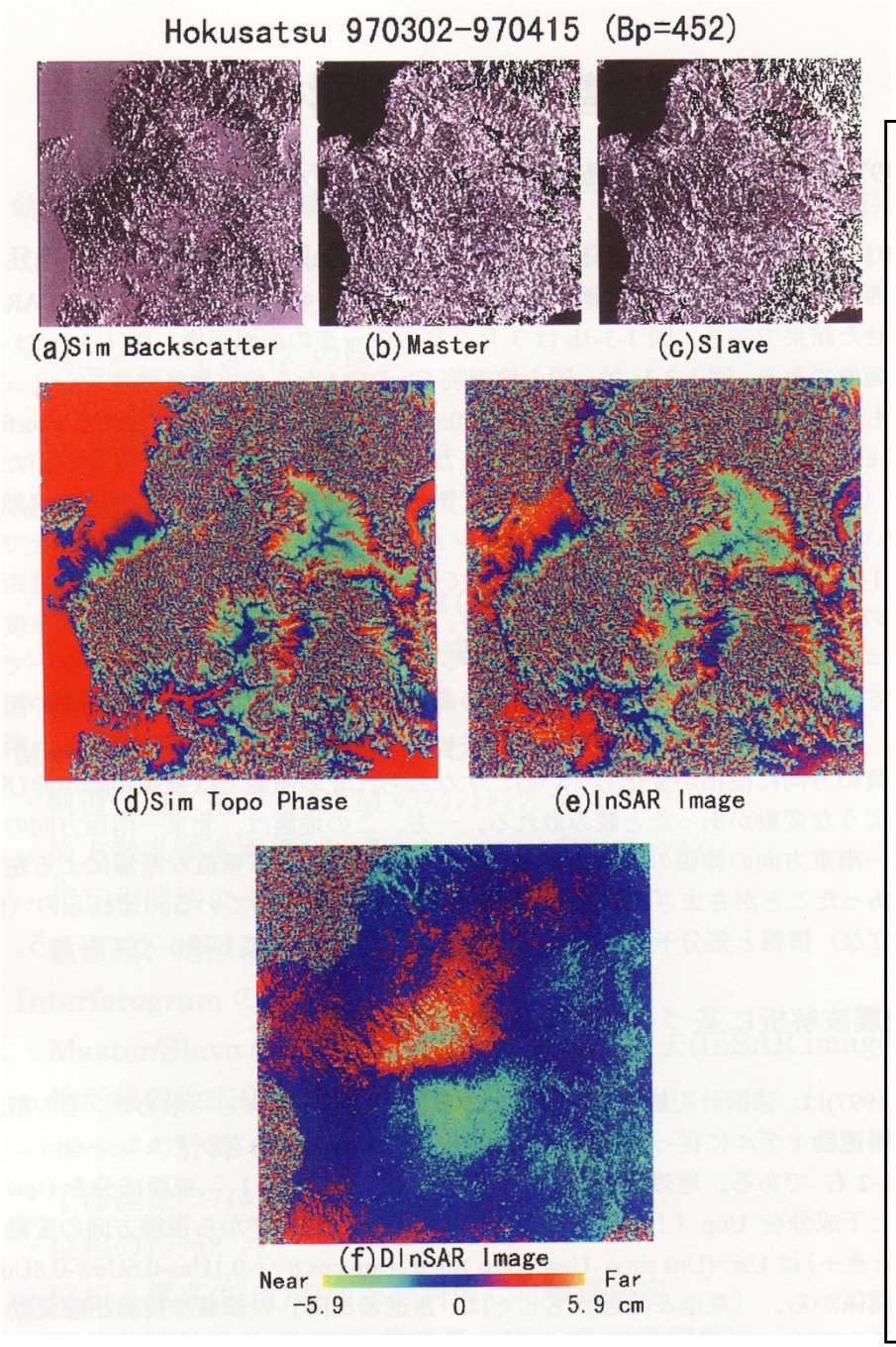
Phase Unwrapping（位相差のつなぎ合わせ）





グラフの傾きから垂直基線長Bpが推定できる

−π～＋πの範囲を繰り返す位相データの不確定性（±2nπ）を加えて連続した値に直す操作。

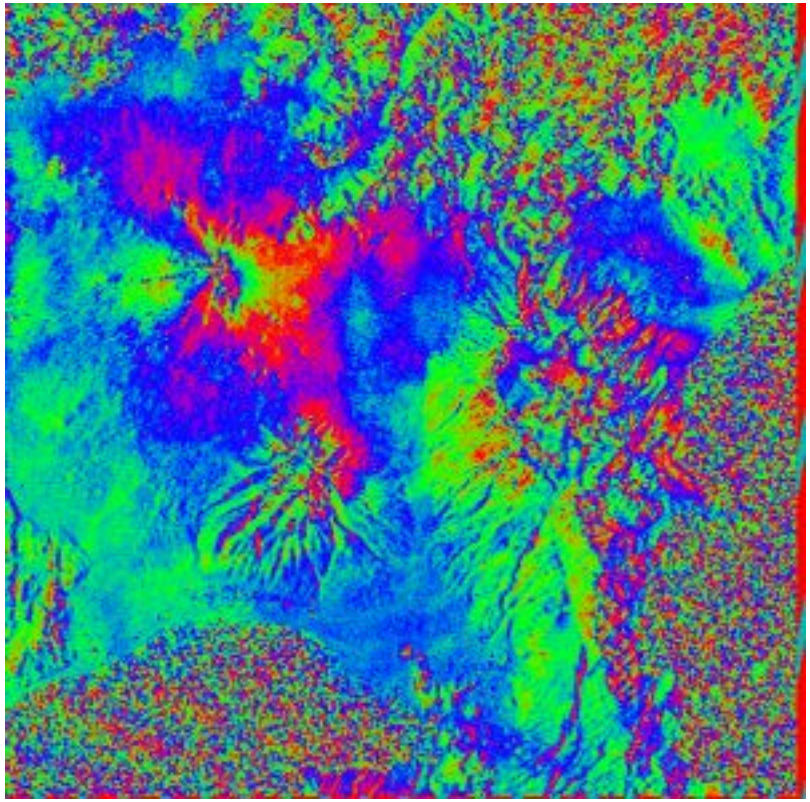


干渉SARの解析手順

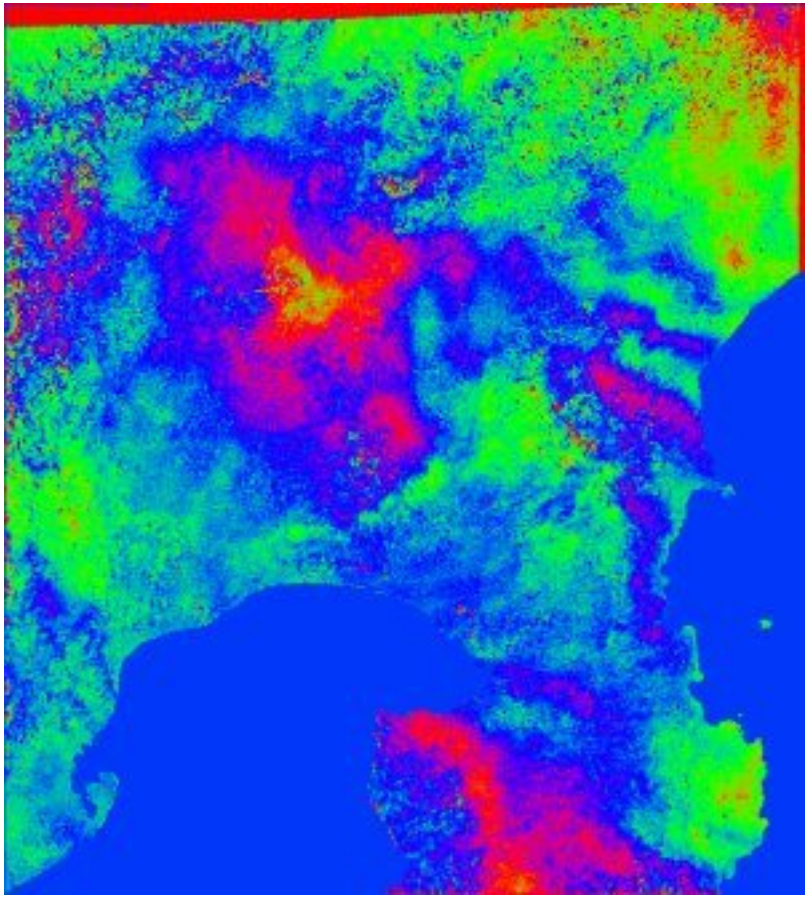
①2枚のSAR生データの再生（SLC: Single Look Complex データの作成）
②Master/Slaveの2枚のSAR画像のマッチングと重ね合わせ
（SAR強度情報を用いた相関係数の計算）
　＊誤差は0．1～0．2ピクセル
　＊ラフな基線推定を行う。
③Master/Slaveの位相差を求め初期干渉画像を計算する。

④DEM（数値標高モデル）から後方散乱強度のｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ画像を作りMaster SARとマッチングさせる。
⑤軌道縞と地形縞をｼﾐｭﾚｰｼｮﾝする。
⑥初期干渉画像から⑤を引き算する。
⑦基線要素(Bperp, Bpara, Yaw角)などを微調整し、残差位相を除去する。
＊**基線の高精度な推定**が不可欠
⑧高精度基線情報に基づいて、もう一度、計算を繰り返す。
⑨地殻変動による位相差が抽出される。

画像マッチング関数（Master SARとDEM）の最適化

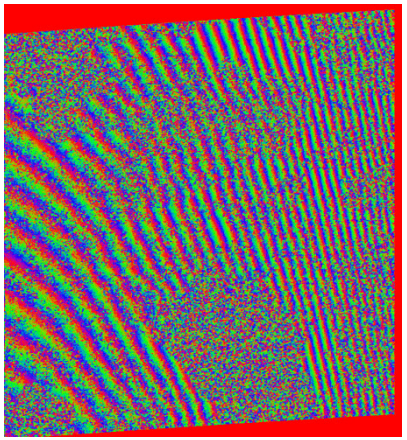


共１次関数



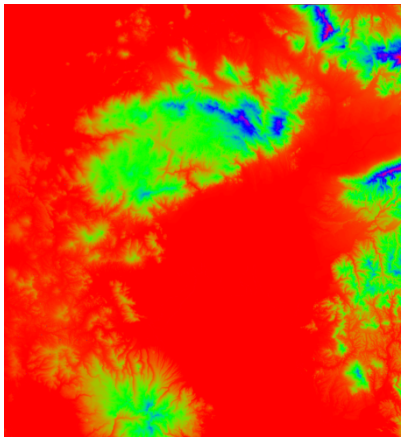
共２次関数

基線の高精度推定

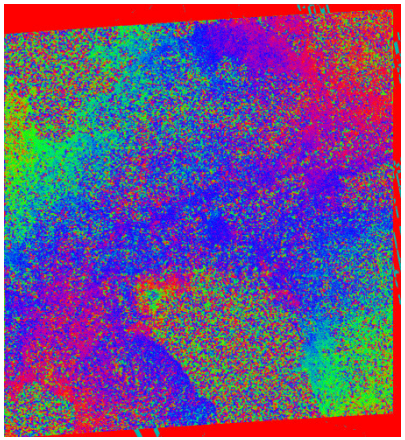


①：座標誤差最小化による基線推定結果による差分干渉位相

②：Bperp, Bpara, Yawを未知数とした残差軌道縞の推定結果

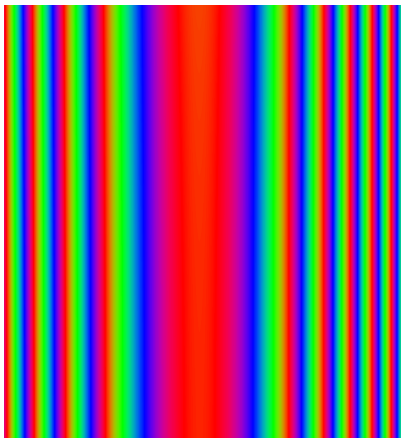


③：Bperp (Bpara, Yaw)を未知数とした残差地形縞の推定結果

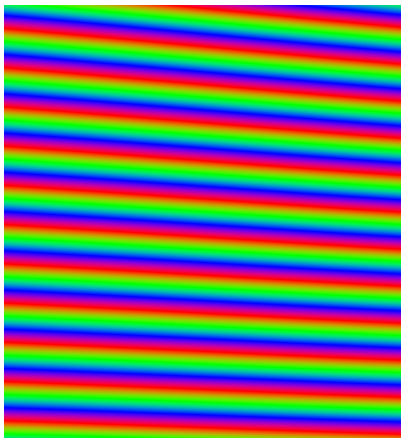


④：①から②と③を引いた結果（このデータ対の場合、標高に比例する大気遅延効果はほとんどみられない。
Bperp = 522.9 (m)
Bpara = 325.5 (m)
dh/dphi = 100.5 (m/2π)

⑤：Bperpの効果
⊿Bperp=-36.0 (m)



⑥：Bparaの効果
⊿Bpara=650 (m)



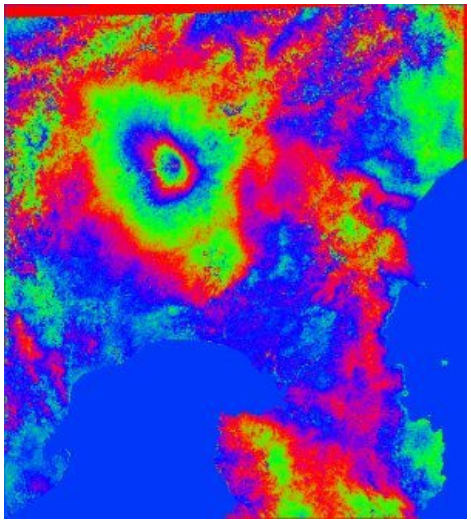
⑦：Yaw angleの効果
⊿Yaw=0.00321 (degree)

Bperp：垂直基線長
Bpara：平行基線長
Yaw　：軌道交差角

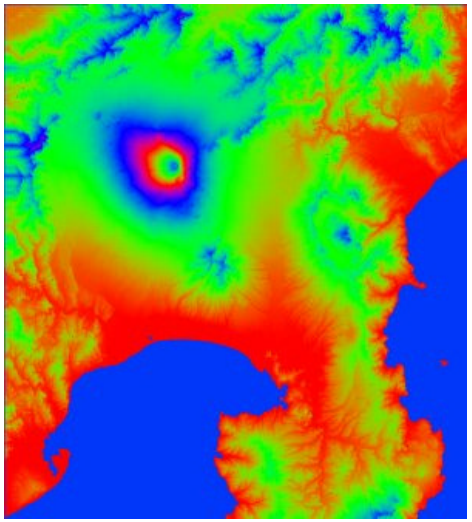
②は⑤、⑥、⑦の重ね合わせから成る。

（JERS-1：佐賀平野1994年1月14日－1997年1月18日）

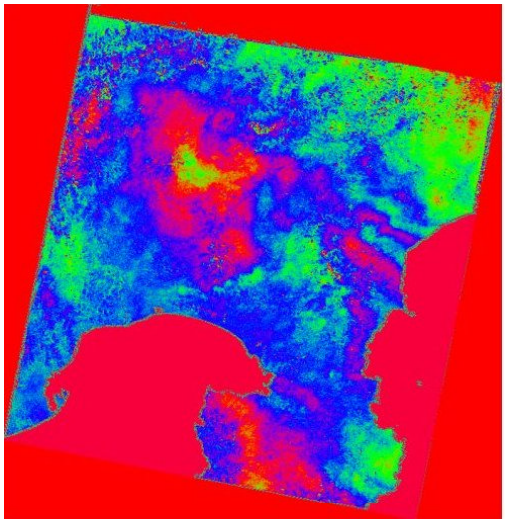
マイクロ波の大気伝播遅延による位相変化（SAR気象学）



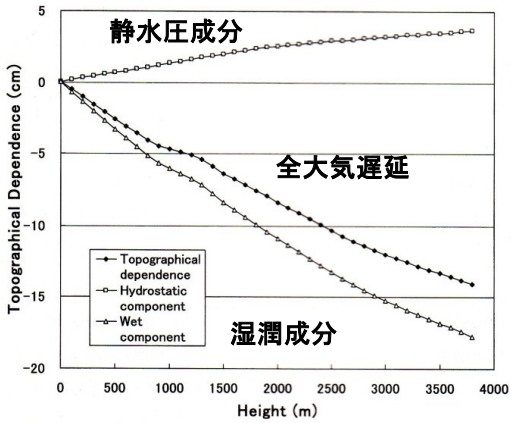
①差分干渉位相（大気遅延含む）



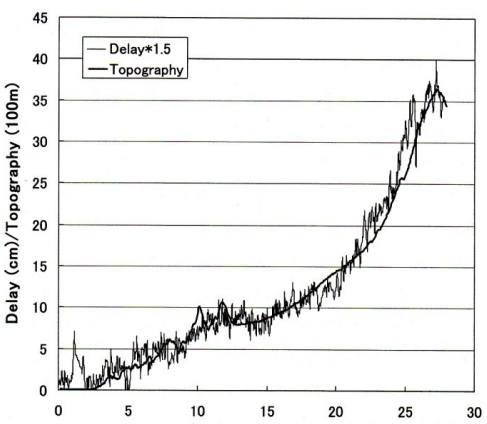
②地形と相関のある位相成分



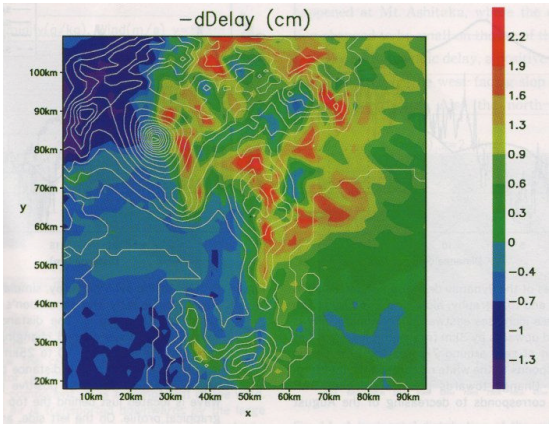
①－②：湿潤遅延成分



気象データから計算される全大気遅延・静水圧遅延成分・湿潤遅延成分

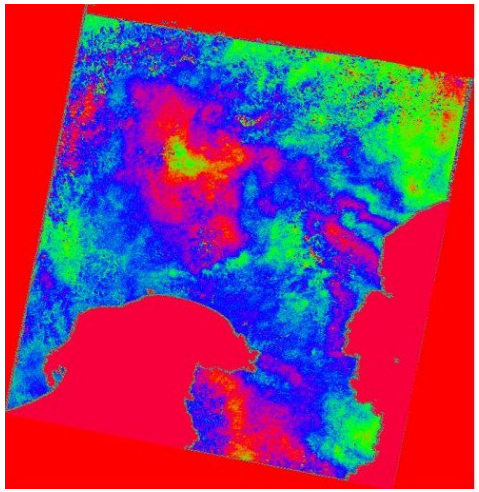


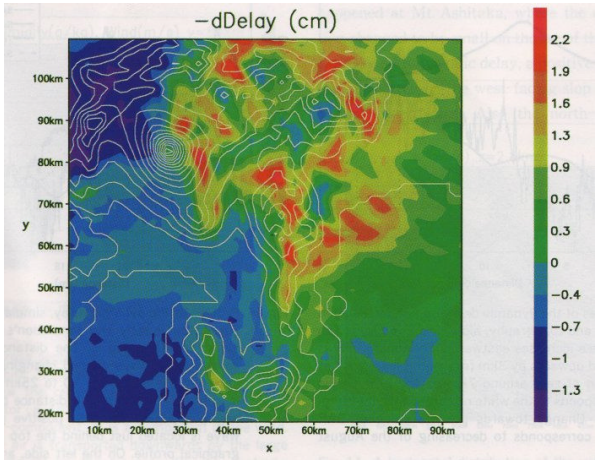
差分干渉位相と地形の相関

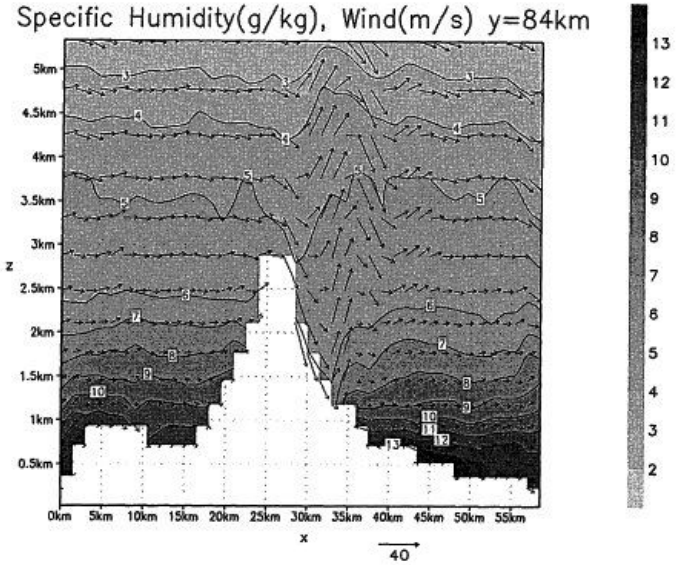


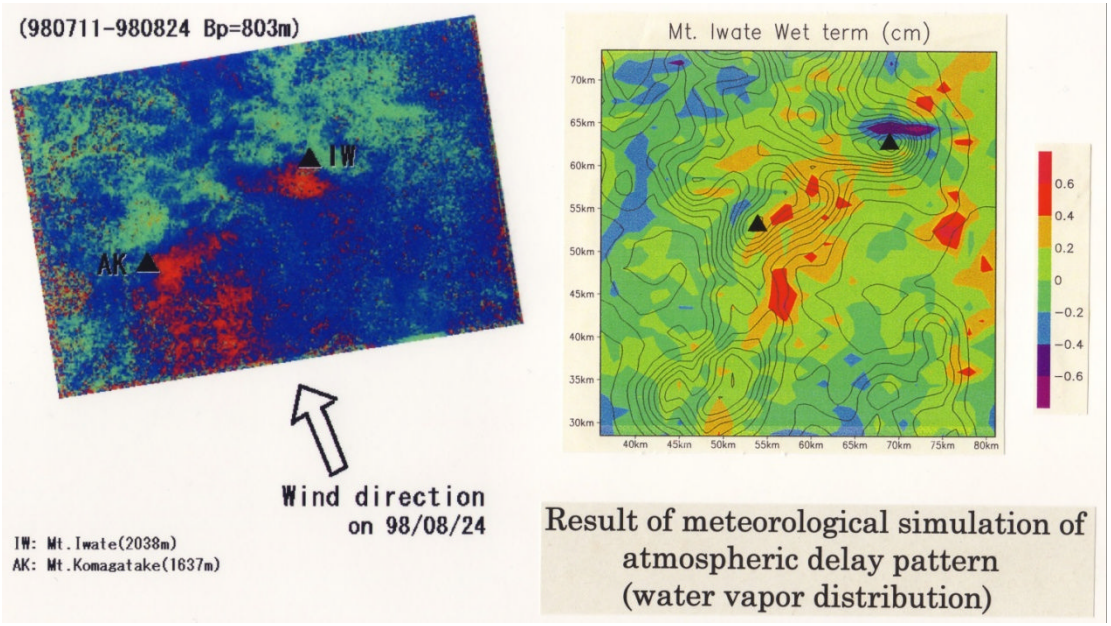
風によるダイナミックな効果を取り入れた湿潤大気遅延成分予測

山岳波による大気遅延の縞々パターン（富士山、岩手山）









湿った大気が山頂を超える時、風上側斜面では遅延量が増加し、山頂のすぐ背後では強い下降流により遅延量が減少するため、山頂を挟んで正負の遅延位相パターンが現れる。

円錐形の火山などで要注意！

まとめ

・太陽同期・準回帰軌道（ALOS：46日回帰）
・SAR＝飛翔体から斜め下にマイクロ波を照射し、地面からの後方散乱波を受信する。強度だけでなく位相も計測する。
・干渉SAR＝地殻変動のイベントの前後で、同一地表点の位相差を求めること
・**「干渉する」＝位相差が空間的に滑らかに連続すること**
・位相差の計算は1ピクセルごとに行うが、干渉画像の解像度は数ピクセル
・位相差には標高差に比例する成分がある⇒地形縞から地形図を作成できる。
・画像から基線を精密に推定することで、（DEMを用いて）地形縞をシミュレーションし、初期干渉画像から差し引くことで、視線方向の地殻変動を表す干渉画像が得られる。
・（2地点間の相対的な）位相差2πが視線距離変動λ/2（＝12cm、Lバンド）に相当し、虹色のカラーバーで表現する（干渉画像）。

・地殻変動の計測には波長の長いLバンドが有利。植生域や険しい山岳地帯でも計測可。
・マイクロ波の**大気伝搬遅延を気象学的に検証**することができる。

・地殻変動を高精度で議論するためには、これらの基本的なことをよく理解しておかねばならない。