3-3

SAR を用いた 3 次元地表変位の検出
－ピクセルオフセットと MAI－
Mapping Three-Dimensional Surface Displacement
- Pixel Offset and MAI -

奥山 哲（北大）

Satoshi Okuyama (Hokkaido Univ.)

要旨.

SAR を用いた最も一般的な地表変位検出手法は干渉解析であるが，干渉解析では変位の視線方向成分しか検出することができない．アセンディング，ディセンディング両画像を用いることで東西の鉛直断面上の 2 次元変位を求める手法は開発されたものの，実際の 3 次元変位を計算するにはもう 1 成分が必要である．

本講演ではその「最後の 1 成分」を提供することが可能なピクセルオフセット解析および Multiple Aperture Interferometry (MAI)について，PALSAR を用いた場合の解析事例と共に紹介し，現在のポテンシャル，問題点および今後の展望について議論する．

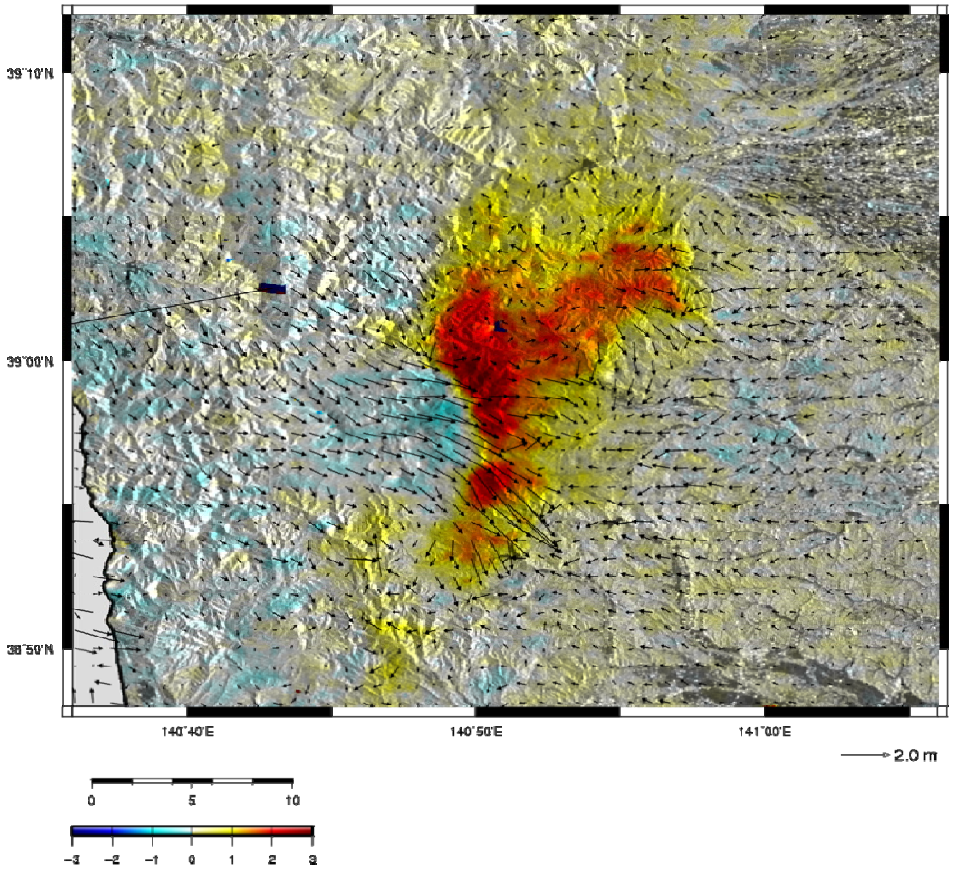


図1． ピクセルオフセット解析を用いて求めた 2008 年岩手宮城内陸地震に伴う地殻変動．

SARを用いた3次元地表変位の検出
－ピクセルオフセットとMAI－

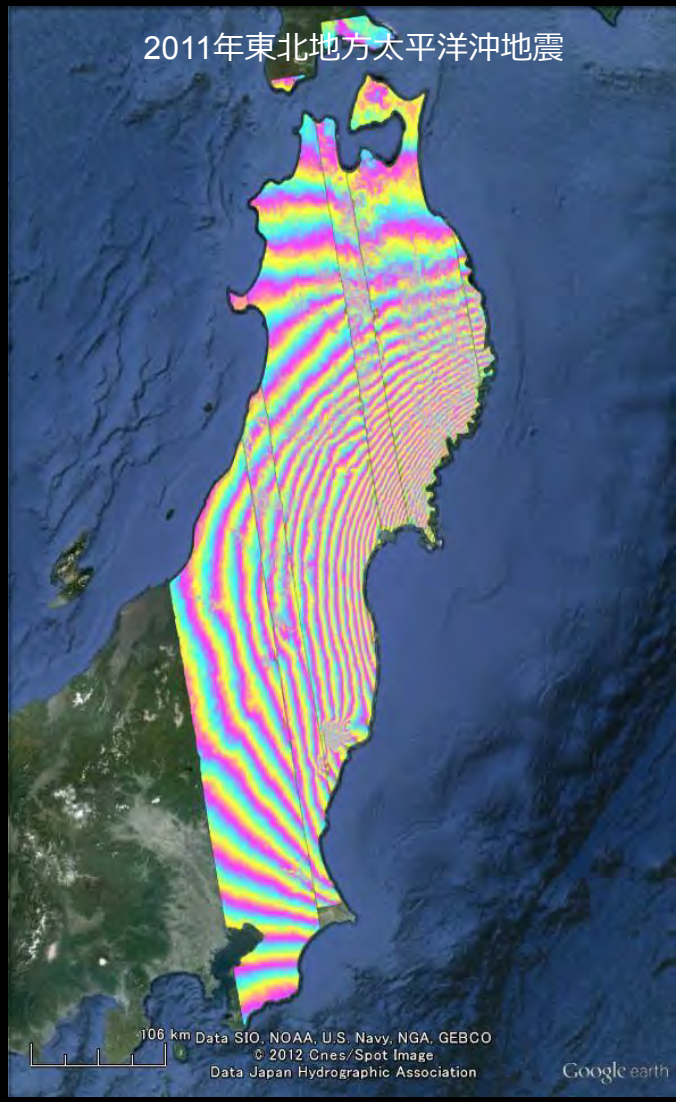
北大地震火山センター　　奥山 哲

はじめに

干渉SAR：地表変位の視線方向成分を広範囲・高分解能で検出

$$u_{obs} = E_{LoS} U$$

u_{obs} - 観測される変位量
E_{LoS} - 視線方向の単位ベクトル
U - 3次元地表変位

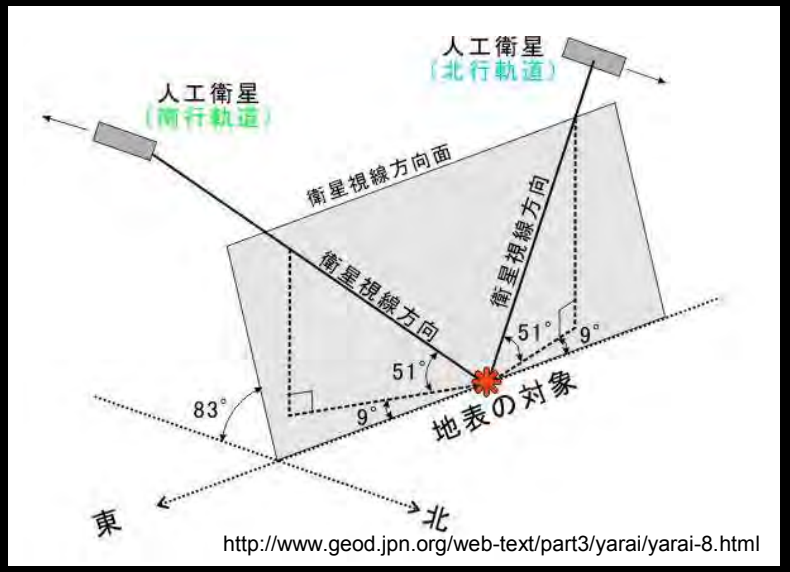


2.5次元解析

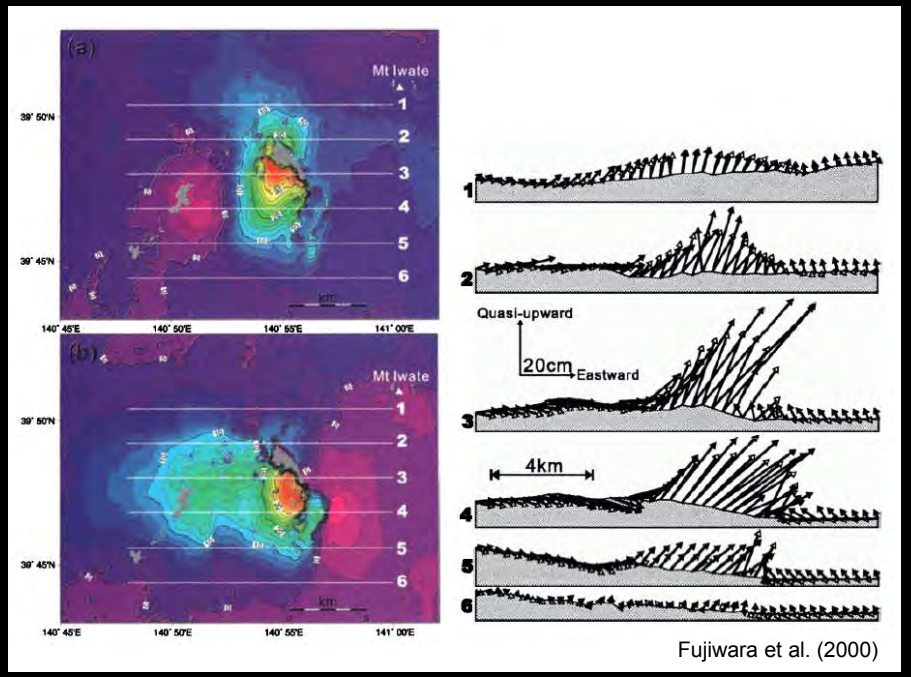
アセンディング・ディセンディング両画像から東西・（ほぼ）上下変位を計算

$$\begin{pmatrix} u_A \\ u_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{Ax} & e_{Az} \\ e_{Dx} & e_{Dz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_z \end{pmatrix}$$

u_A, u_D - 観測される変位量
$E_A=(e_{Ax}, e_{Az}), E_D$ - 視線ベクトル
$U=(u_x, u_z)$ - 2次元変位



http://www.geod.jpn.org/web-text/part3/yarai/yarai-8.html



Fujiwara et al. (2000)

3次元変位の計算

1視線方向につき1観測なので，3方向から観測できれば3次元変位が復元できる

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{LoS1} \\ E_{LoS2} \\ E_{LoS3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$$

- 航空機SAR
- ピクセルオフセット解析
- Multiple Aperture Interferometry（MAI）

ピクセルオフセット解析

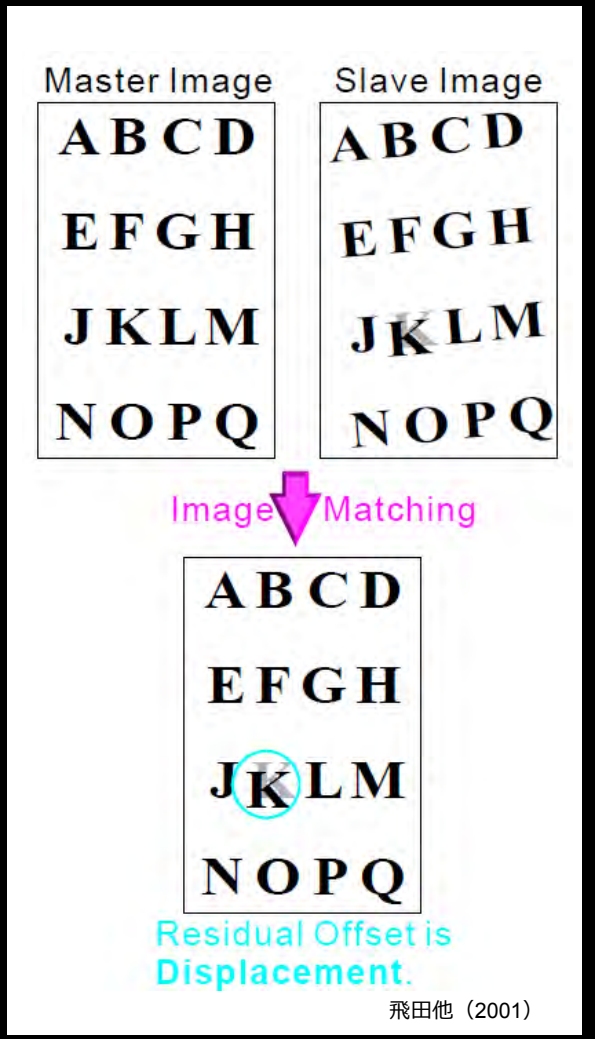
ピクセルオフセットの原理

1）2枚の画像からそれぞれ満遍なく小領域をとり，そのそれぞれについてずれ量（レンジ方向，アジマス方向）を計算する

2）求めたずれ量の分布から画像全体のずれ・ゆがみを表す多項式を最小2乗的に計算する

3）多項式から計算されるずれ量と実際のずれ量との差が2次元地表変位（レンジ方向，アジマス方向）

最後の1成分！



ずれ量の計測

1）2枚の画像からそれぞれ小領域$i_1(i,j)$,$i_2(i,j)$をとる

2）dx,dyを変化させながら面積相関$\gamma(dx,dy)$を計算する

$$\gamma(dx,dy)=\frac{\mathrm{cov}\left(i_1(i,j),i_2(i+dx,j+dy)\right)}{\sigma\left(i_1(i,j)\right)\sigma\left(i_2(i+dx,j+dy)\right)}$$

$cov(a,b)$ – 共分散
$\sigma()$ – 標準偏差

3）$\gamma(dx,dy)$が最大となる(dx,dy)がその点のずれ量

※ サブピクセルのずれを計測するには相関の計算前に
小領域をオーバーサンプルする

ずれ量の計測

1）2枚の画像からそれぞれ小領域$i_1(i,j)$,$i_2(i,j)$をとる

2）それぞれをフーリエ変換し，クロススペクトルを計算する

$$i_i(\omega_i,\omega_j) = F\{i_i(i,j)\}$$

$$C(\omega_i,\omega_j) = i_1(\omega_i,\omega_j)i_2^*(\omega_i,\omega_j)$$

3）ずれ量が(dx,dy)の時，正規化したクロススペクトルは三角関数になる

$$\frac{C(\omega_i,\omega_j)}{\left|C(\omega_i,\omega_j)\right|} = e^{i(\omega_i dx+\omega_j dy)}$$

4）これをフーリエ逆変換すると(dx,dy)にピークをもつδ関数になる

$$F^{-1}\left\{e^{i(\omega_i dx+\omega_j dy)}\right\} = \delta(i+dx, j+dy)$$

気をつけるべきこと

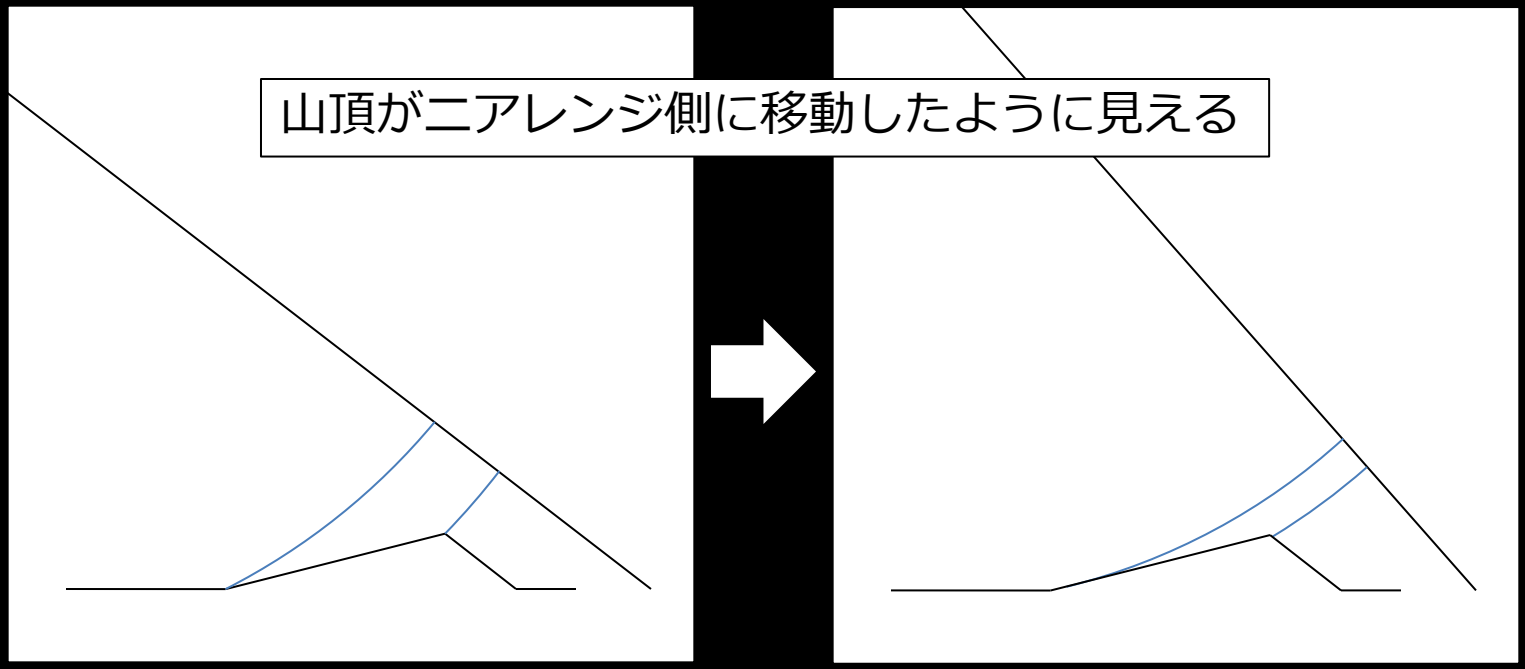
・ウィンドウサイズの選択
　大→安定、低空間分解能
　小→高空間分解能、不安定

・全体のずれ・ゆがみを表す多項式の次数

$$dx=a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + ...$$

平行移動　回転　シアー　2次の項

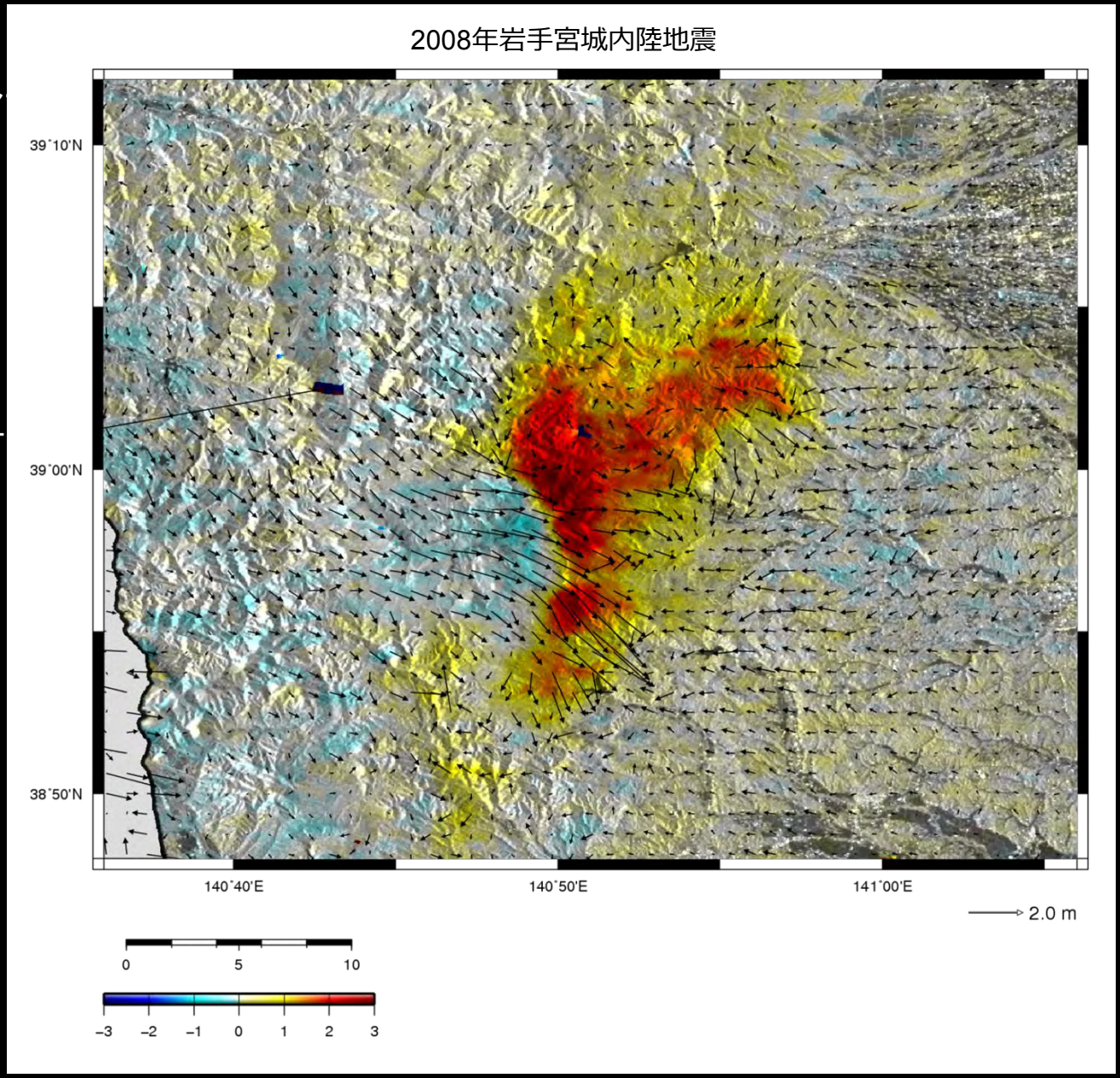
・フォアショートニングの差



ピクセルオフセットから3次元変位へ

アセン

を解け



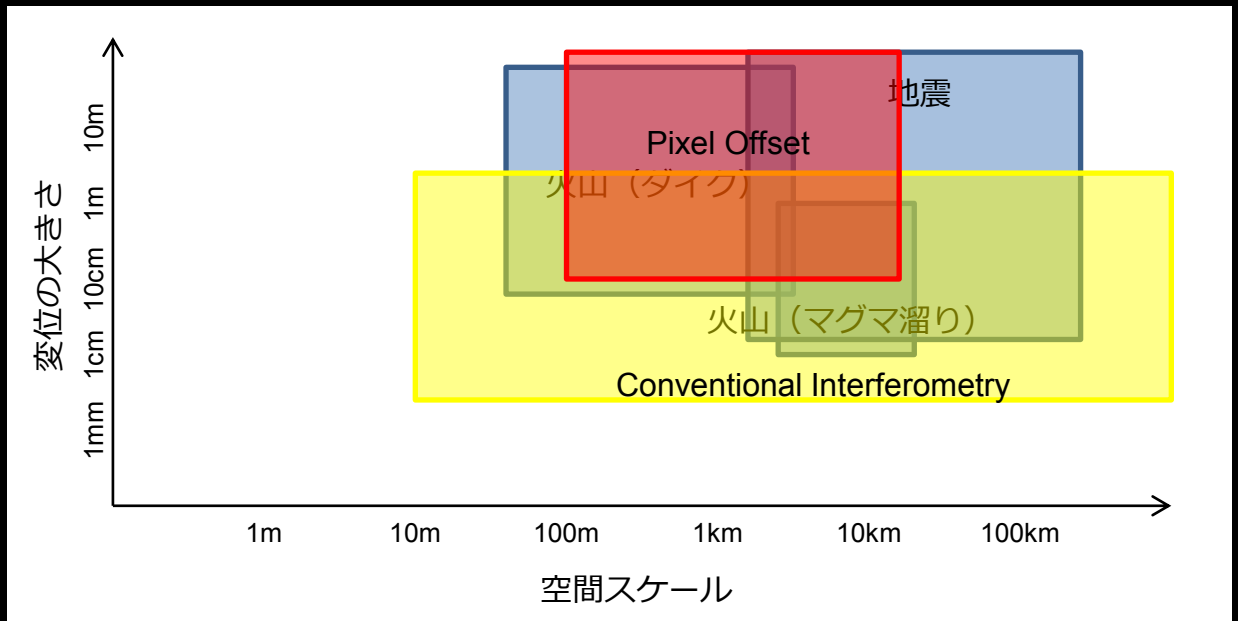
ピクセルオフセットの性能

空間スケール

面積相関を計算する必要から，1ピクセル単位の変位量は計算できない．実用上最低32x32ピクセル（PALSARの場合約150x110m）は必要．安定してオフセットを推定するにはウィンドウサイズが大きい方がよい．また，シーン全体の位置合わせをする必要があるため，2011年東北地方太平洋地震のように変動域がシーンを覆う場合は他観測手段を用いて全体の位置合わせをしなければ変位量が計算できない

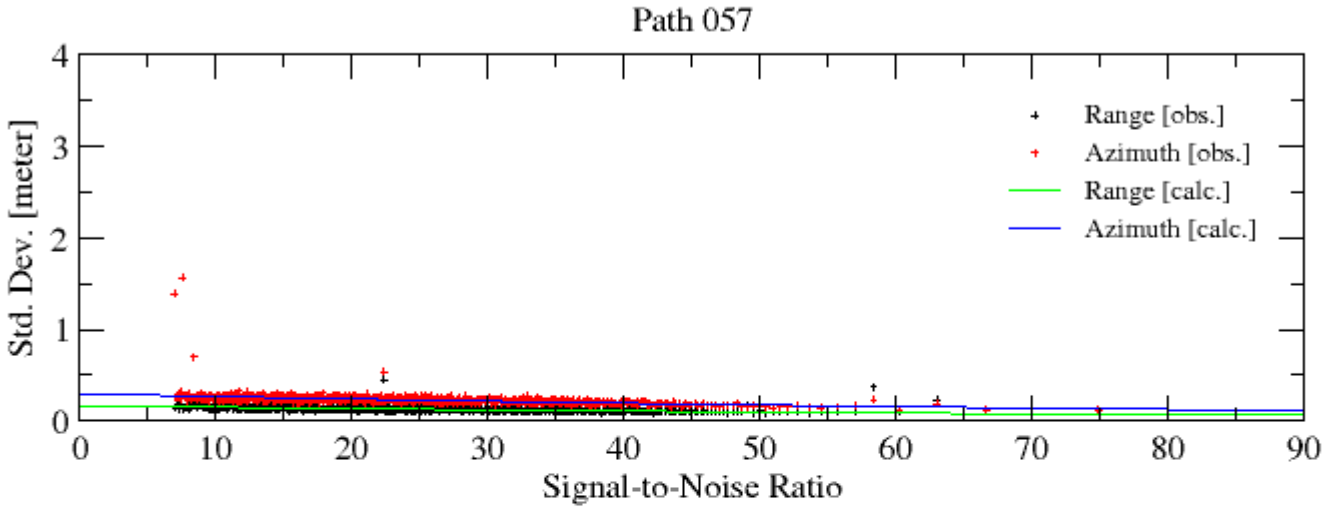
検出できる変位の大きさ

サブピクセル単位の位置合わせは通常の干渉処理でも行うので，最小で0.1ピクセル（4～50cm）程度．最大は基本的に制限なし



ピクセルオフセットの精度

2008年岩手宮城内陸地震

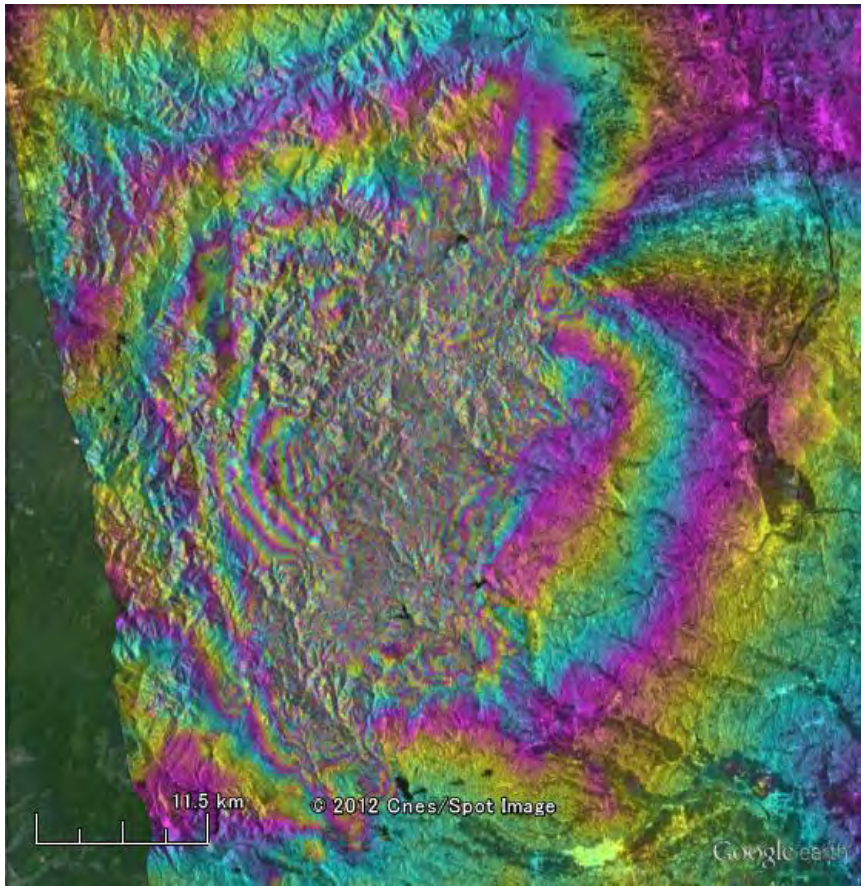


$$\sigma_{offset} = 0.17 \times e^{-0.077(SNR)} \quad \text{(Range)}$$
$$= 0.30 \times e^{-0.011(SNR)} \quad \text{(Azimuth)}$$

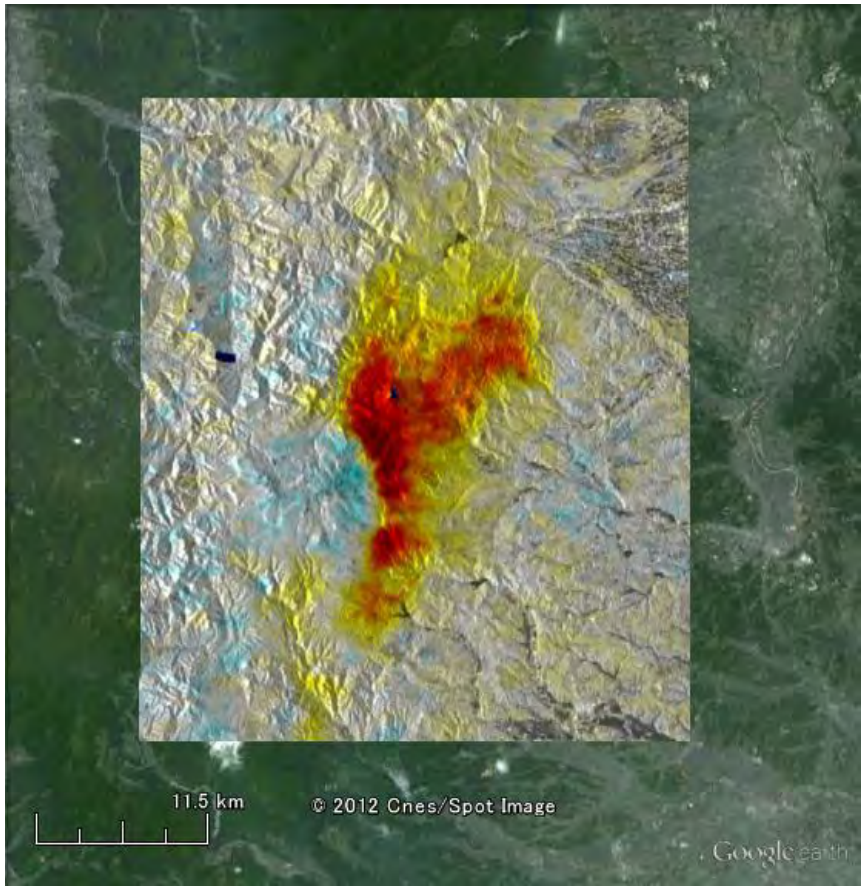
条件が良ければ15～30cm

その他の利点

InSAR



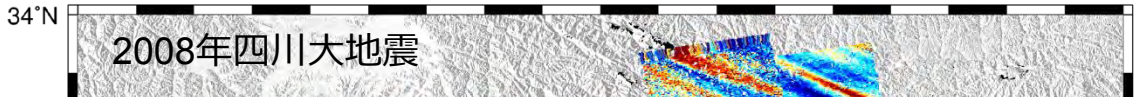
Pixel Offset

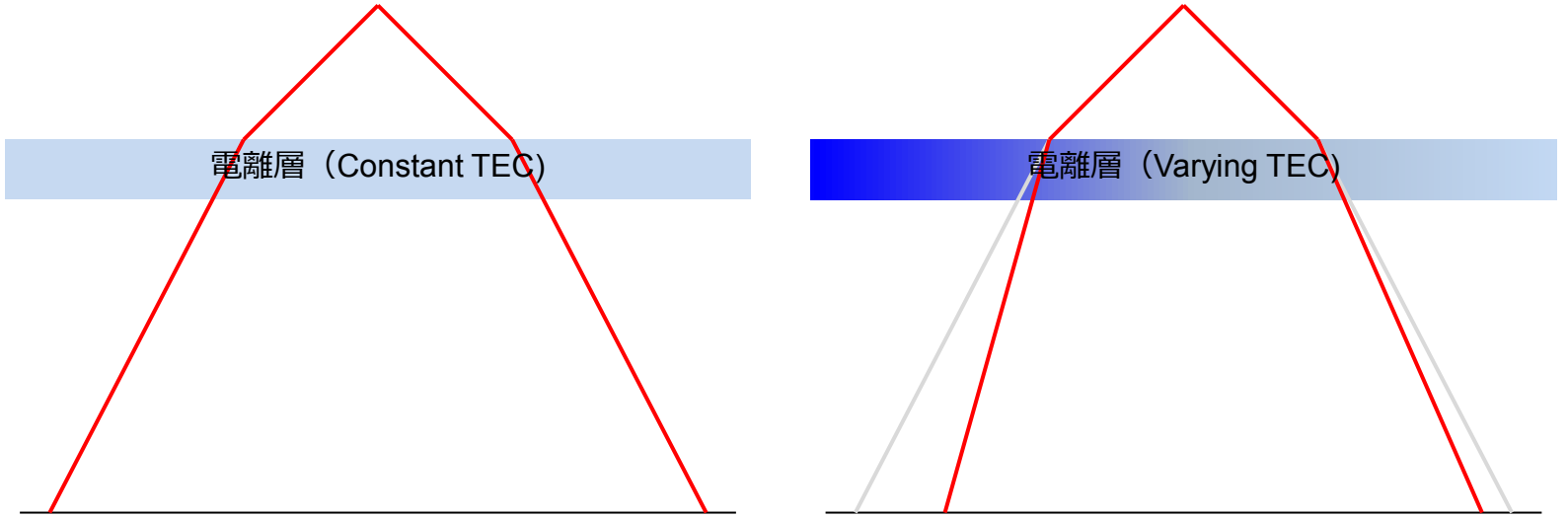


検出できる最大変位量に制限がないため,
変位が大きすぎて干渉しない領域でもデータが得られる

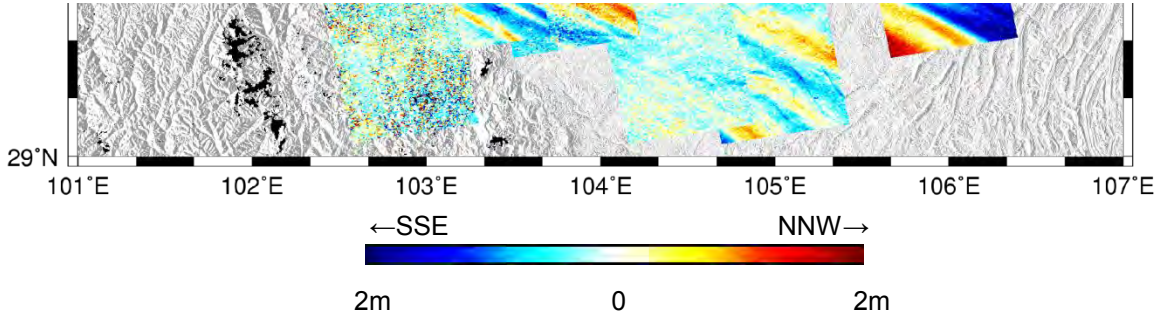
ピクセルオフセットの課題

Azimuth成分に妙な縞が！





電離層の影響でビームが曲がるため（多分）



Multiple Aperture Interferometry

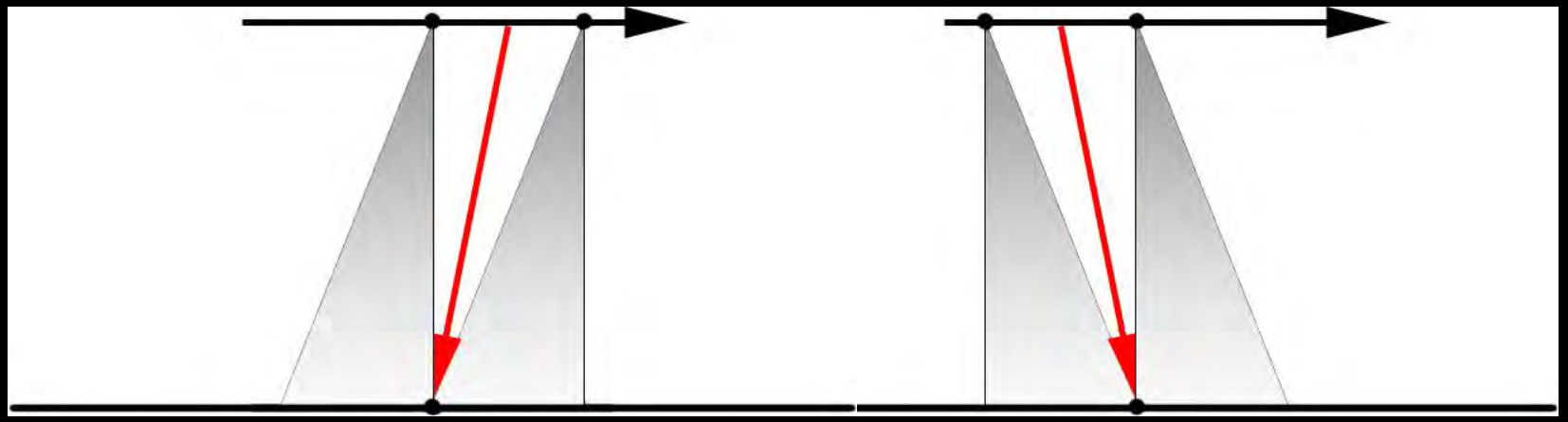
MAIの原理

1）レーダービームの前半分/後ろ半分のみを用いて前方視/後方視の画像を作成

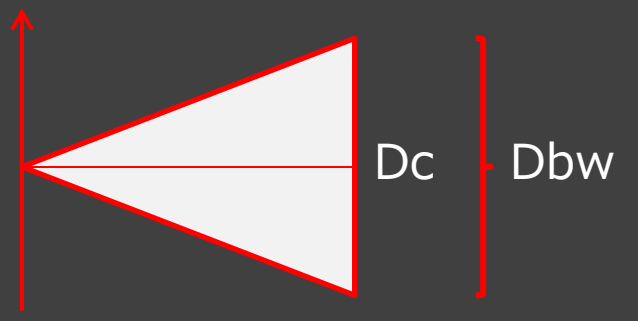
2）前方視、後方視それぞれで干渉処理

3）２つの干渉画像の差を取る

→ 地表変位のレンジ方向成分はキャンセルされ、アジマス方向成分のみが残る



前方視，後方視の分け方（Bechor and Zebker, 2006）



Conventional

Dc: Doppler Centroid
Dbw: Doppler Bandwidth

MAI – Forward Looking

$Dc_f = Dc + Dbw/4$
$Dbw_f = Dbw/2$

MAI – Backward Looking

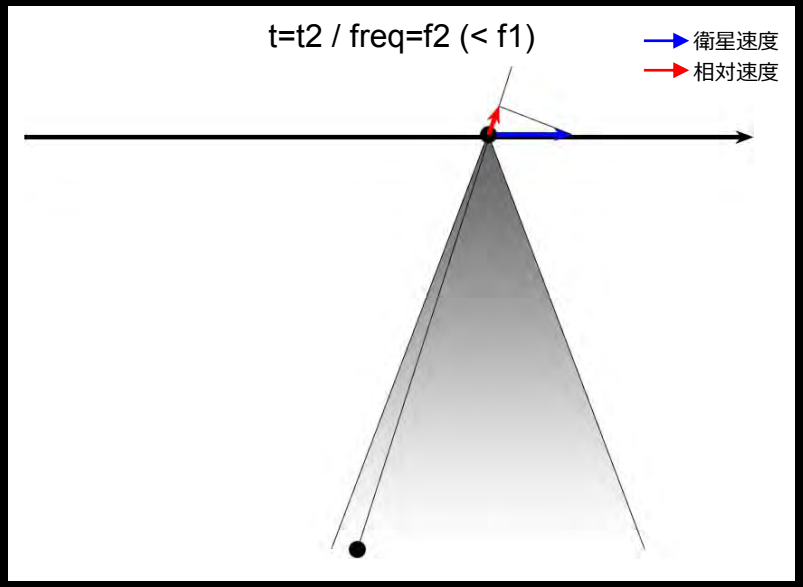
$Dc_b = Dc - Dbw/4$
$Dbw_b = Dbw/2$

$Dc_{b/f}$, $Dbw_{b/f}$を使ってアジマス圧縮を行う

前方視・後方視の分け方（Barbot et al., 2008）

SLCにアジマス方向の1次元lowpass/highpassフィルターをかける

・レンジドップラーを用いて合成開口処理を行う場合、各パルスに含まれる特定のターゲットからの後方散乱は、そのドップラー周波数によって抽出される



(t=t0のパルスの周波数f0の成分)＋(t=t1のパルスの周波数f1の成分)＋･･･ ＝ SLC

→ SLCの周波数f0の成分はt=t0のパルスの寄与、周波数f1の成分は･･･

→周波数＞f1の部分を見れば前方視、周波数＜f1の部分を見れば後方視

前方視・後方視画像作成後の処理手順

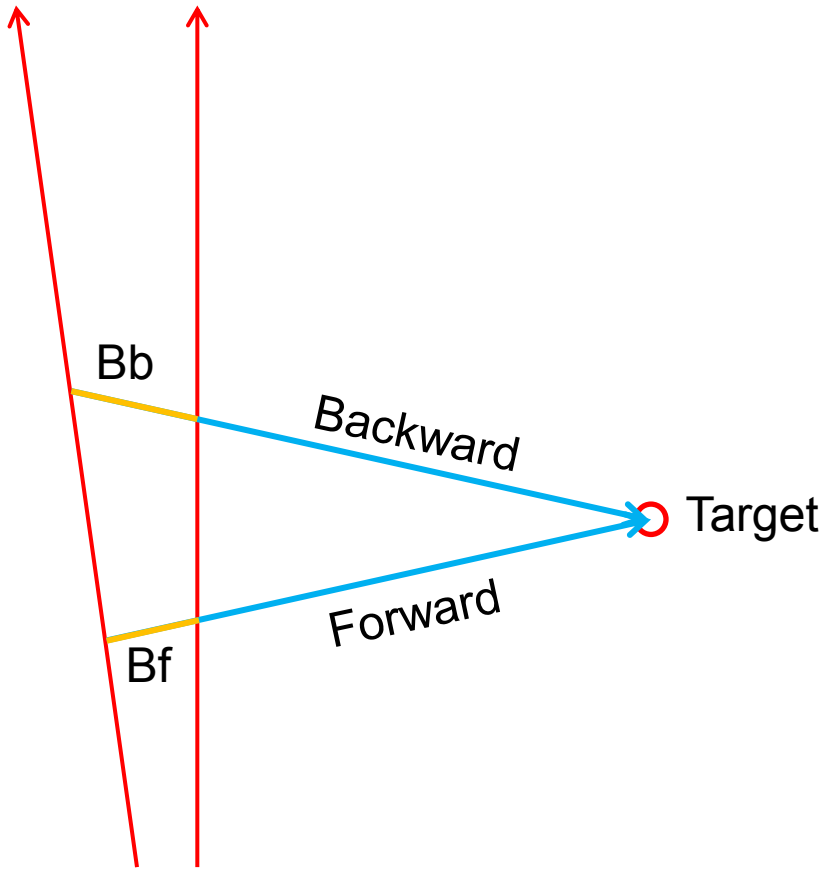
1） 前方

2） 地形

3） フィ

4） 前方

5） 地形



BfとBbの差をbaselineとする軌道縞・地形縞が生じる

位相から変位量への変換

ビーム幅をθとすると視線ベクトルは、
前方視： $+\theta/4$
後方視： $-\theta/4$

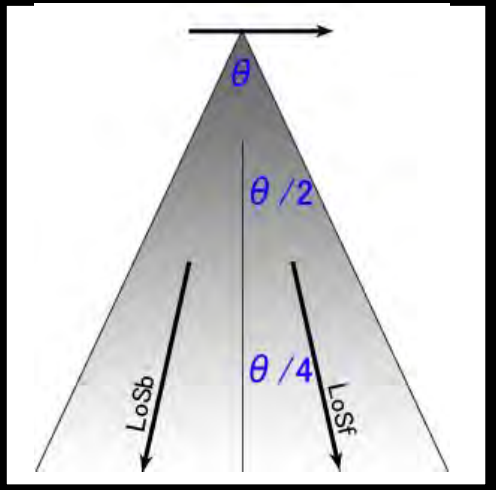
アジマス方向の地表変位をUとすると、
前方視の位相： $(4\pi/\lambda)U\sin(\theta/4)$
後方視の位相： $(4\pi/\lambda)U\sin(-\theta/4)$
なので、
両者の位相差： $(8\pi/\lambda)U\sin(\theta/4)$

アンテナ長をLとすると、
ビーム幅θ： λ/L

$\lambda \ll L$なので
$\sin(\theta/4) = \sin(\lambda/4L) \fallingdotseq \lambda/4L$

結局、
両者の位相差： $(2\pi/L)U$
位相変化2πに対応する地表変位： L

※ PALSARのアンテナ長：8.9m



気をつけるべきこと

干渉性！　干渉性！　干渉性！！

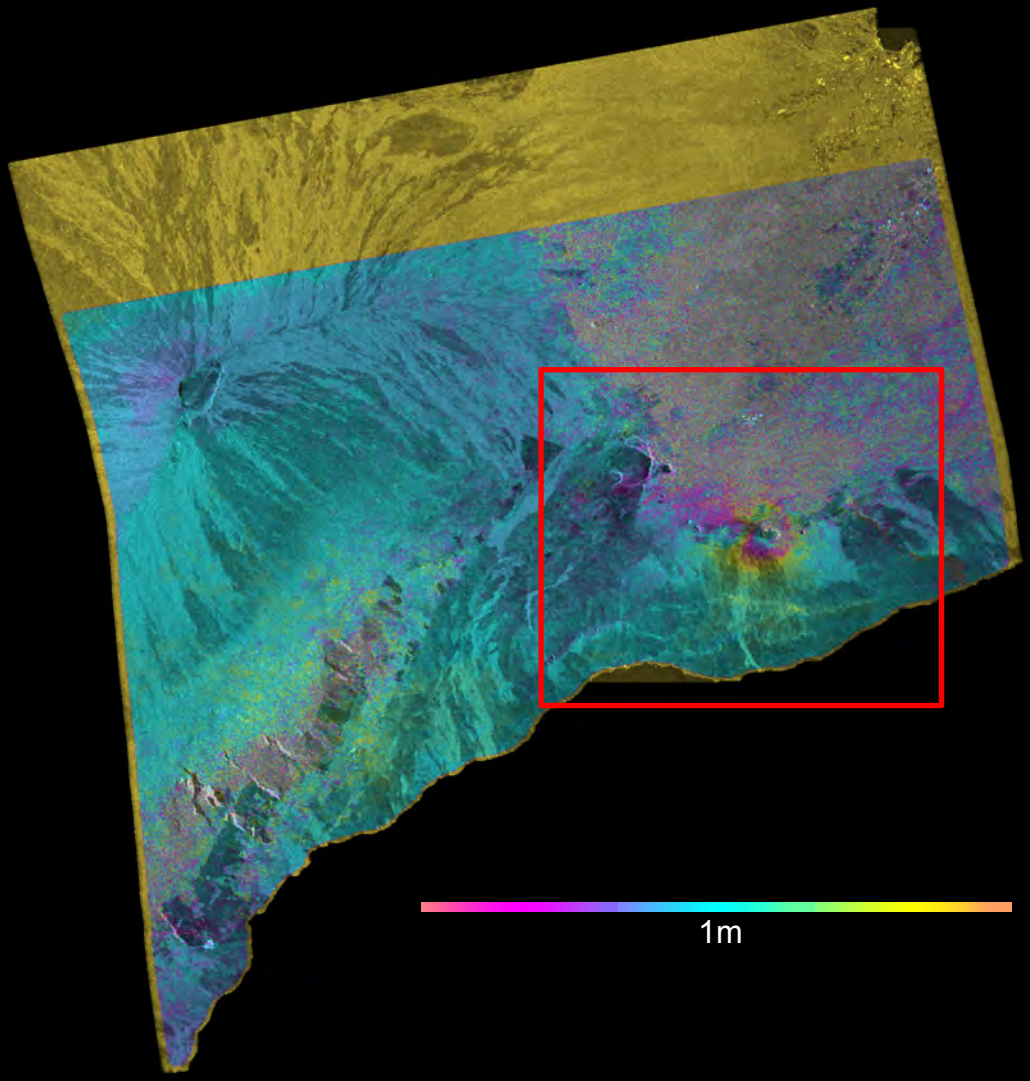
帯域の半分を捨ててしまっているので、通常の干渉処理よりもコヒーレンスが落ちてしまう

＝ よりシビアなB⊥の要求

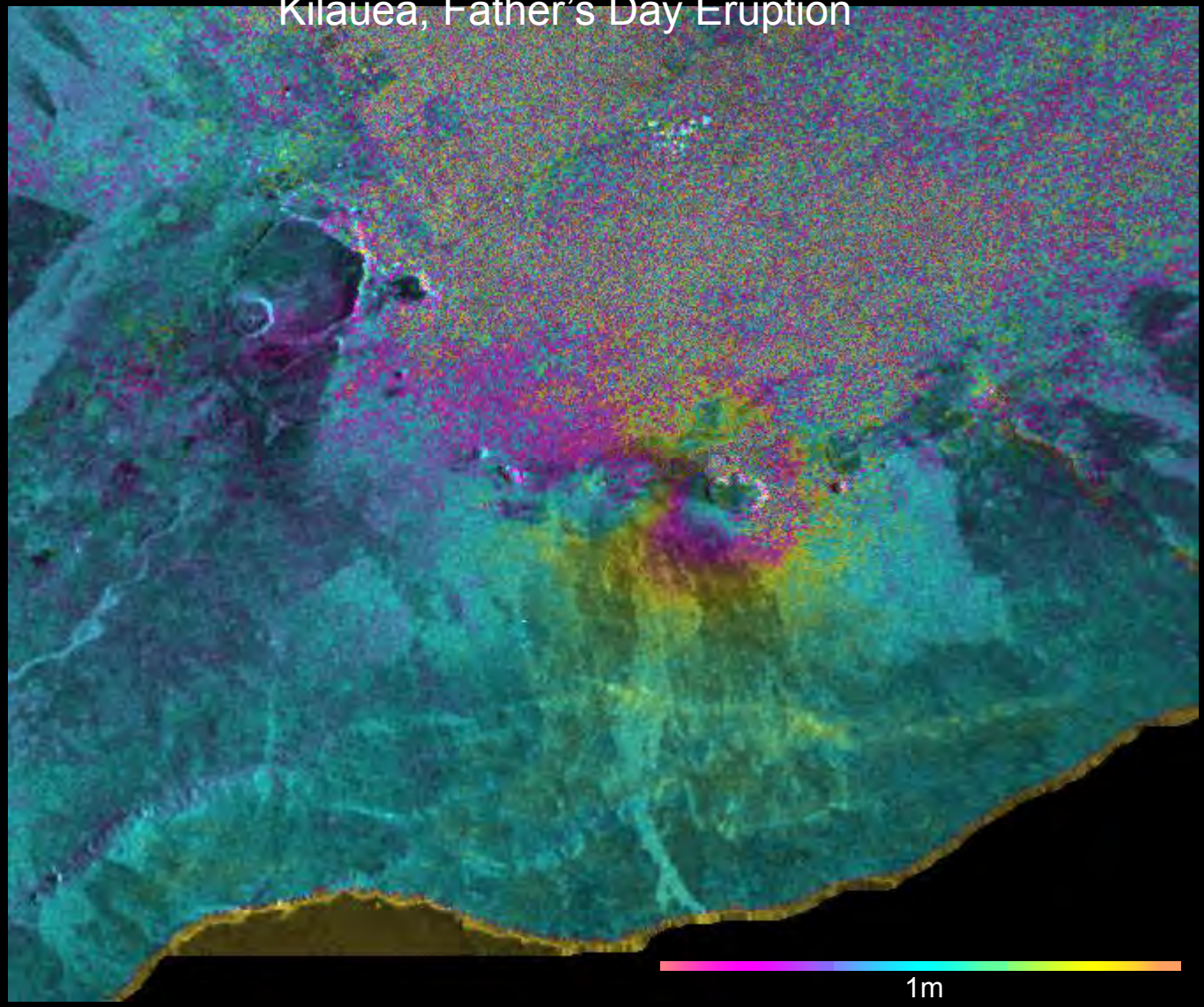
＝ 地表変位に対する感度は波長によらないので、Lバンド有利

MAIによるアジマス変位成分

Kilauea, Father's Day Eruption



MAIによるアジマス変位成分



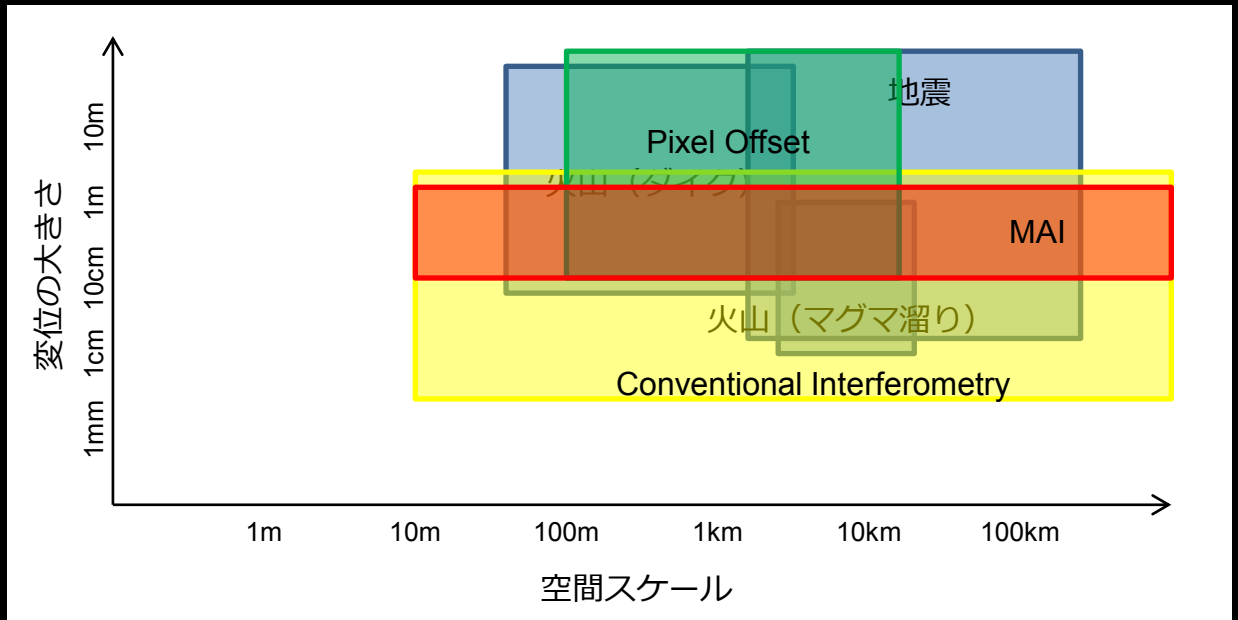
MAIの性能

空間スケール

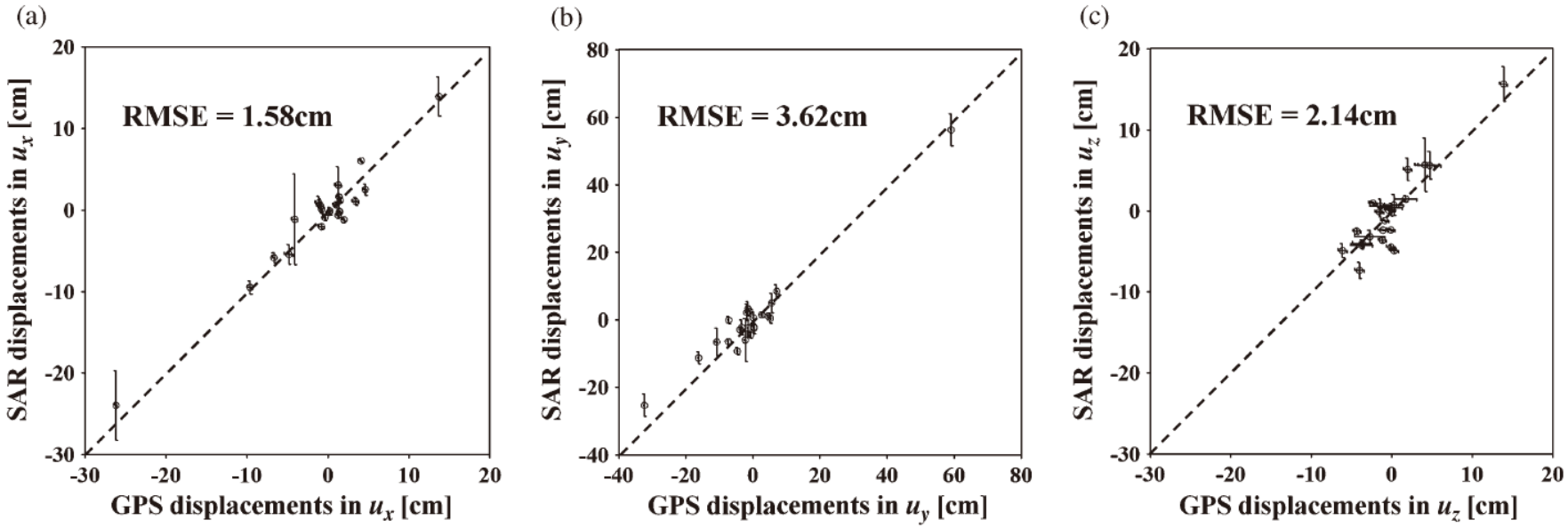
干渉処理と同じだけの分解能が得られる（PALSAR 4ルックなら約20m）．最大スケールも干渉処理に準ずる

検出できる変位の大きさ

Kilauea Father's Day Eruptionのように条件のよいペアであれば最小10cm程度まで迫れる（多分）．最大は干渉処理に準ずるが，ビームの半分しか使用しないことでSNが落ちるため，干渉処理よりも劣る（多分）



MAIの精度

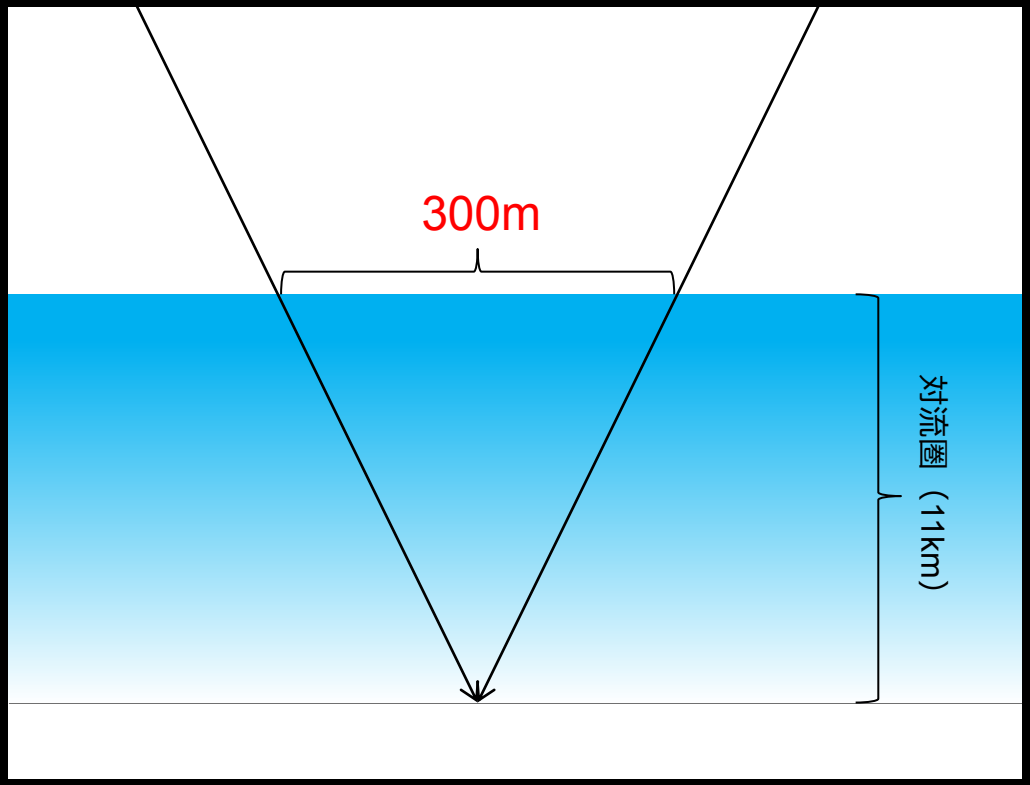


Jung, Lu, Won, Poland and Miklius (2011)

ほぼ完全にMAIから計算した南北成分で見ると，GPSとのRMSE=3.62cm

ほんまかいな・・・

その他の利点

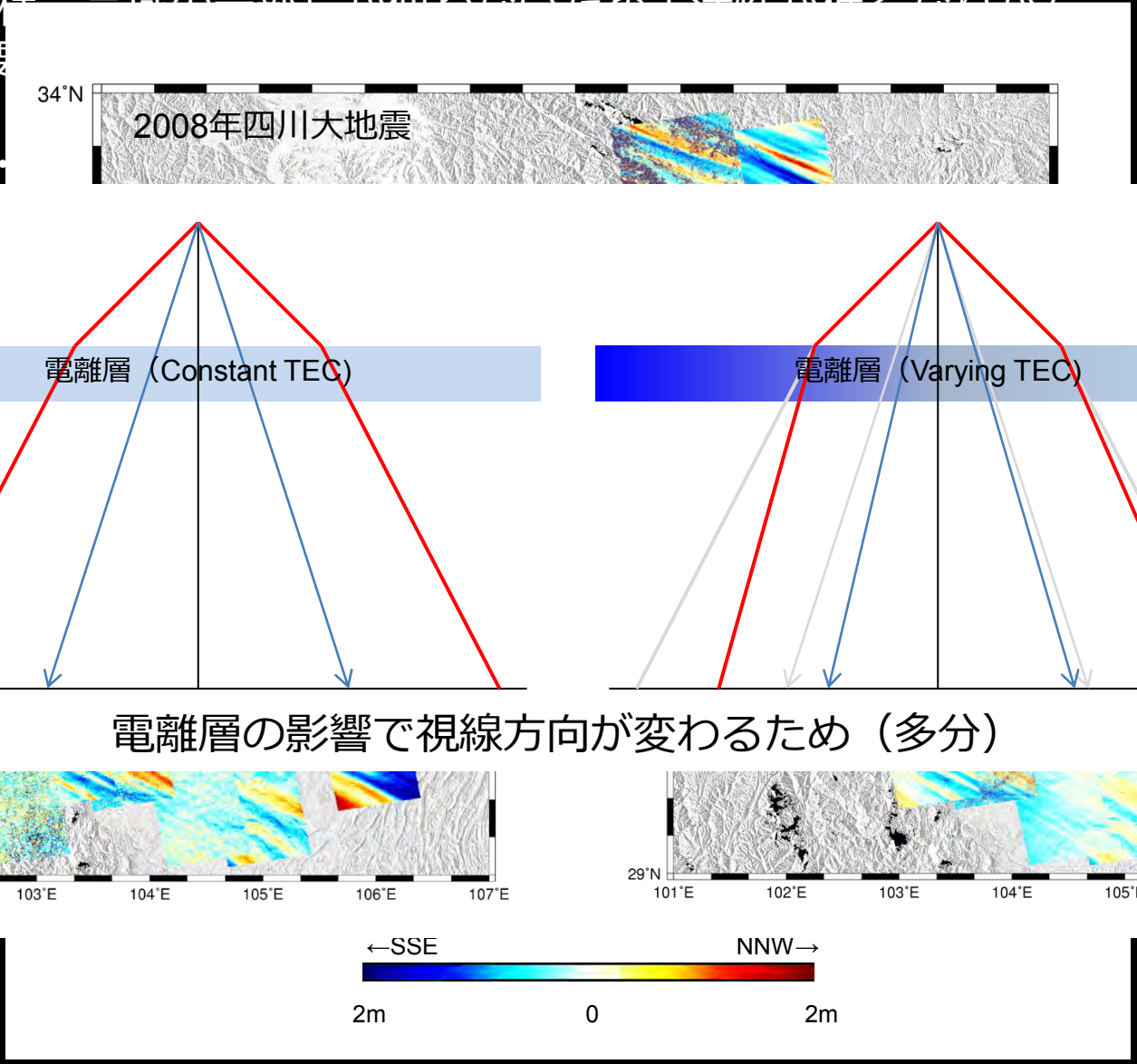


対流圏遅延は考慮する必要なし

MAIの課題

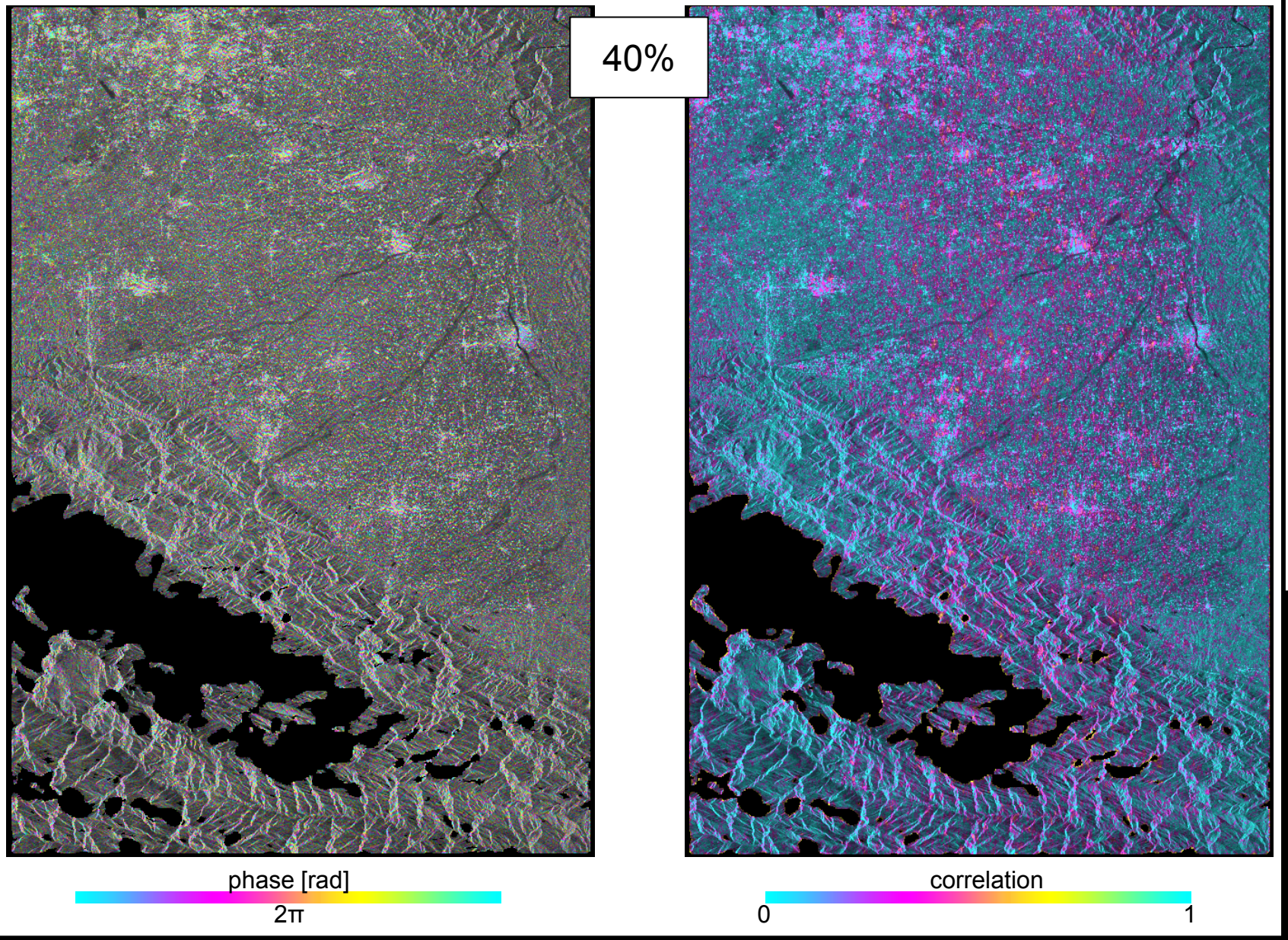
ScanSAR同様、基線の一部しか使わないため干渉性が低くなりがち、すなわち
Baselineの要

そして・・・



今後の展望

SAR衛星のスペック向上による効果



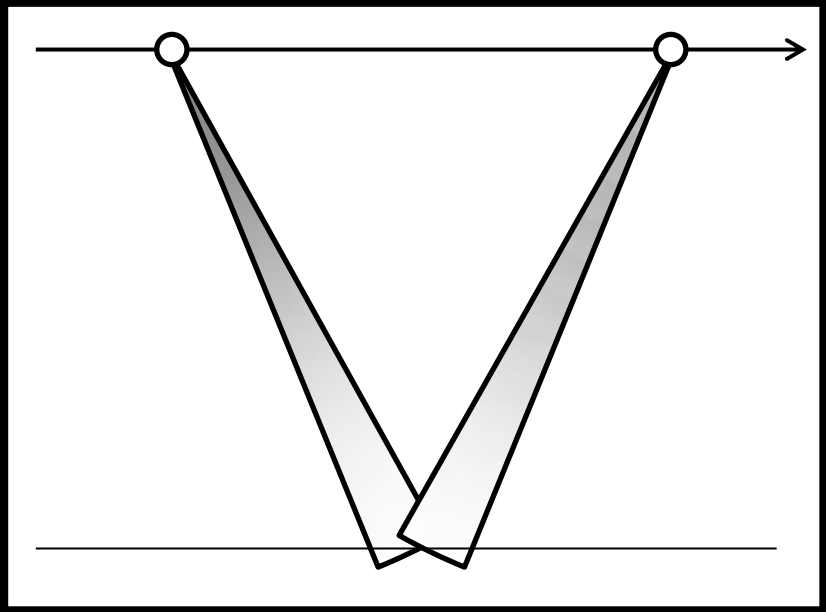
PALSAR-2では

分解能が10mから3m / 6m / 10mに！

ノイズレベルが-23dBから-24dB（3m分解能モード）～-28dB（6m分解能モード）に！

そして・・・スポットライトモード！

分解能1m x 3m！
ビーム幅が非常に広くなるのでMAIの感度アップ！



さらに・・・両方向視！

Ascending, Descendingそれぞれで右方視，左方視することで4方向から観測可能！

PALSAR-2データを用いたピクセルオフセット・MAI

観測モードの多いPALSAR-2ではベースマップの作成・維持にかなりの時間がかかるため，ピクセルオフセットやMAIの出番もきっとある

その他の利点（ピクセルオフセット：大きな変位でも検出できる / MAI：ほとんどの成分はキャンセルされて消える）を売りにする．特にMAIは対流圏遅延の影響をほぼ受けず，前方視・後方視間のBaselineは非常に小さいため（キラウエアのペアではB$_{\perp}$＝64cm※），DEMも実質不要，基線再推定も不要（多分）

電離層遅延は残る．昼間の観測なら影響なしか？

※ Altitude of Ambiguity = 100km

謝　辞

本研究で用いたPALSARデータはJAXAと東大地震研の共同研究契約に基づいてPIXELで共有しているものです．ここに記して感謝いたします．またPALSARデータの所有権はJAXA/METIにあります．