



# 衛星リモートセンシングを用いた 広域の地盤変動解析

竹内 渉

東京大学生産技術研究所

平成26年10月21日

断層変位評価委員会@土木学会



- リモートセンシング技術の発展に伴い，衛星画像を解析することによって，短時間での地盤変動や，海外等の地上の水準点がない地域でも，地盤変動を高精度に，経済的に，広域に把握することが可能となっている。
- 本稿では，1992年以来，欧米や日本で利用されている合成開口レーダ(SAR：Synthetic Aperture Radar)画像を使用し，干渉SAR解析を用いて過去の地表面の変動履歴を算出する手法を解説する。



- 🍏 衛星観測では、広域に面的地表面変動が捉えられるため、地下構造物建設による地盤沈下の検知は比較的容易であるが、森林や河川敷など植生の深い所、反射波が弱いエリア、コンクリートの平面などは、電波の後方散乱が少なく、観測は困難である。
- 🍏 2000年半ばから解析が可能となっている偏波観測、PSInSAR (Permanent Scatterers Interferometry SAR) と呼ばれる、永久散乱体(Permanent Scatterer)と呼ばれる干渉 SAR解析の新手法についても解説する。
- 🍏 この手法を用いれば、従来の干渉 SAR 解析ではないがしるにされていた、コヒーレンスの低い長基線データを無駄にせず利用することができる。また、デジタル数値標高モデルやGPS 等から得られる水蒸気データを用いることなく、大気の遅延ノイズを避けることも可能となる。

# マイクロ波レーダー観測に使用される波長



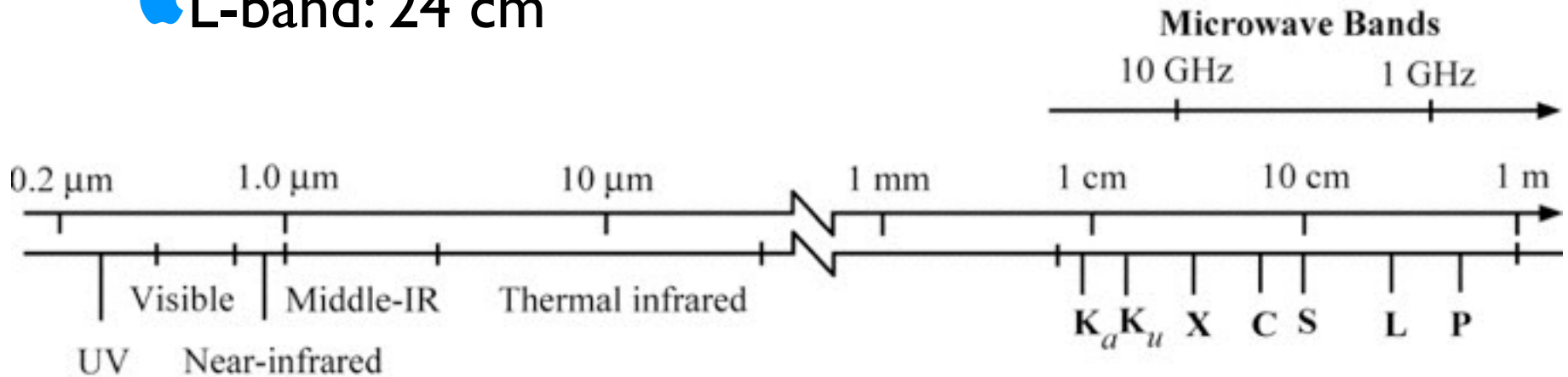
🍏 レーダー観測に利用されるのは0.5 cmから100 cmの波長帯である.

🍏 X-band: 3 cm

🍏 C-band: 6 cm

🍏 S-band: 12 cm

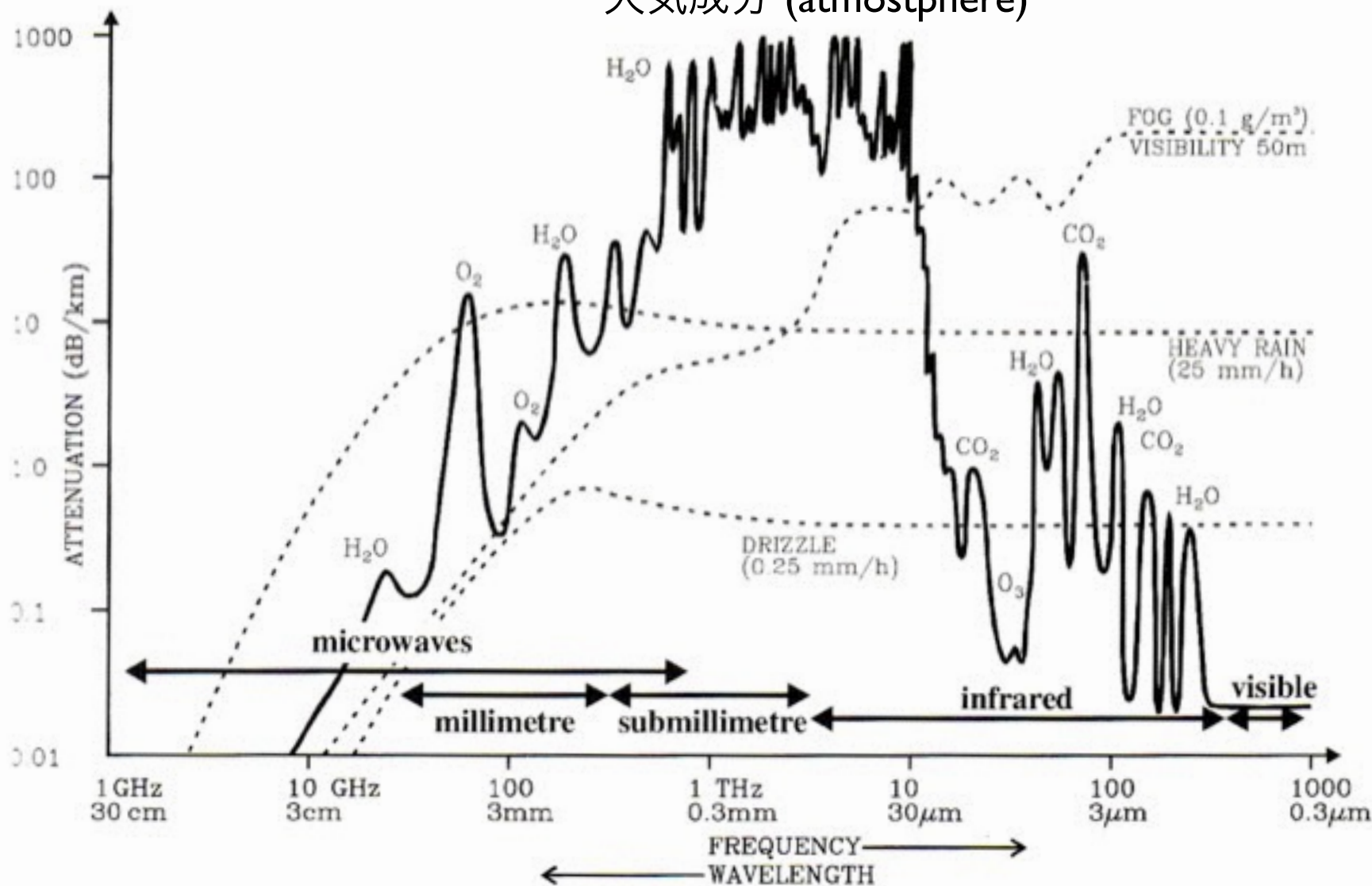
🍏 L-band: 24 cm



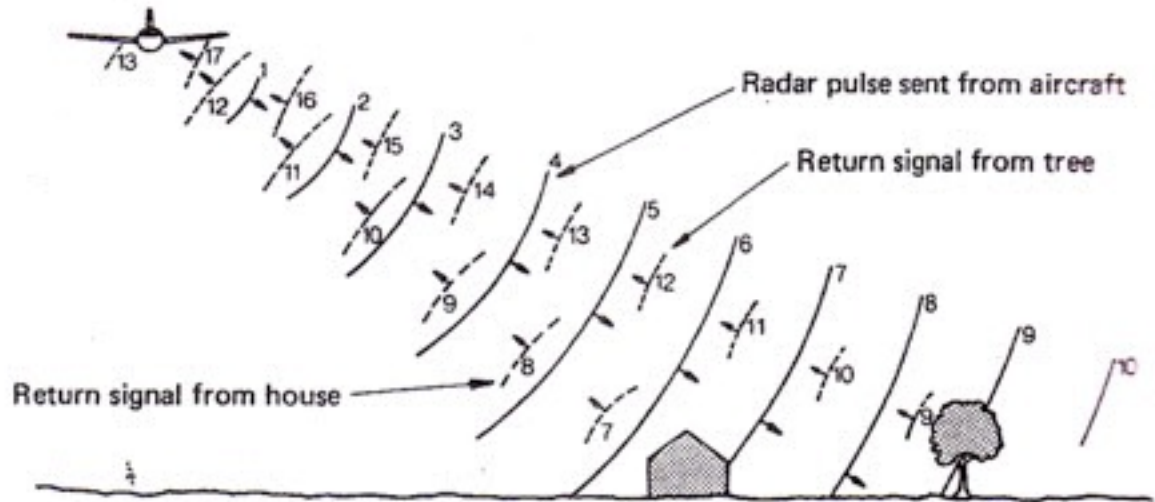
# 大気中の電磁波の減衰



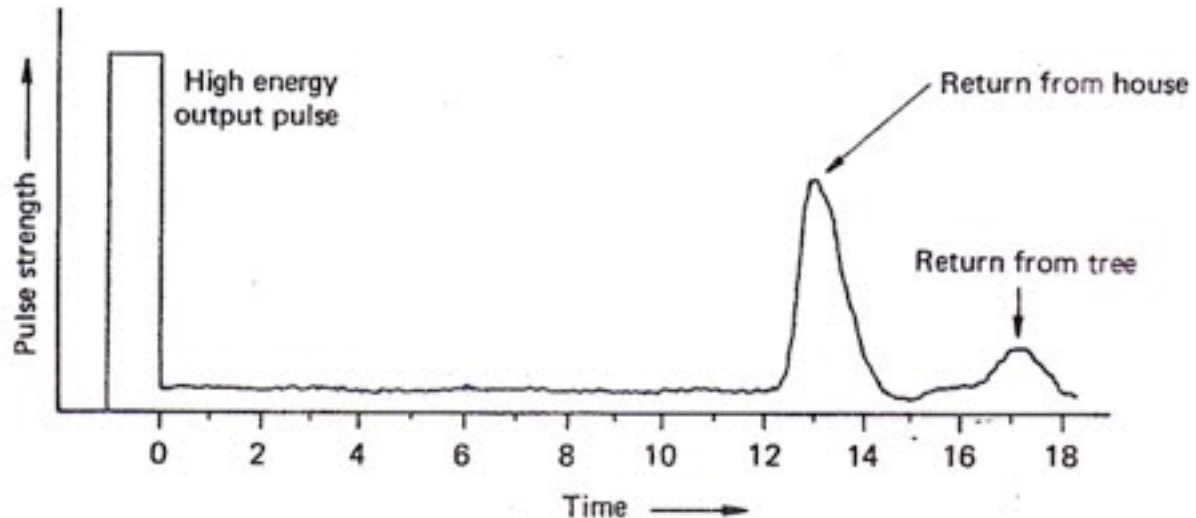
大気成分 (atmosphere)



# レーダー観測の原理

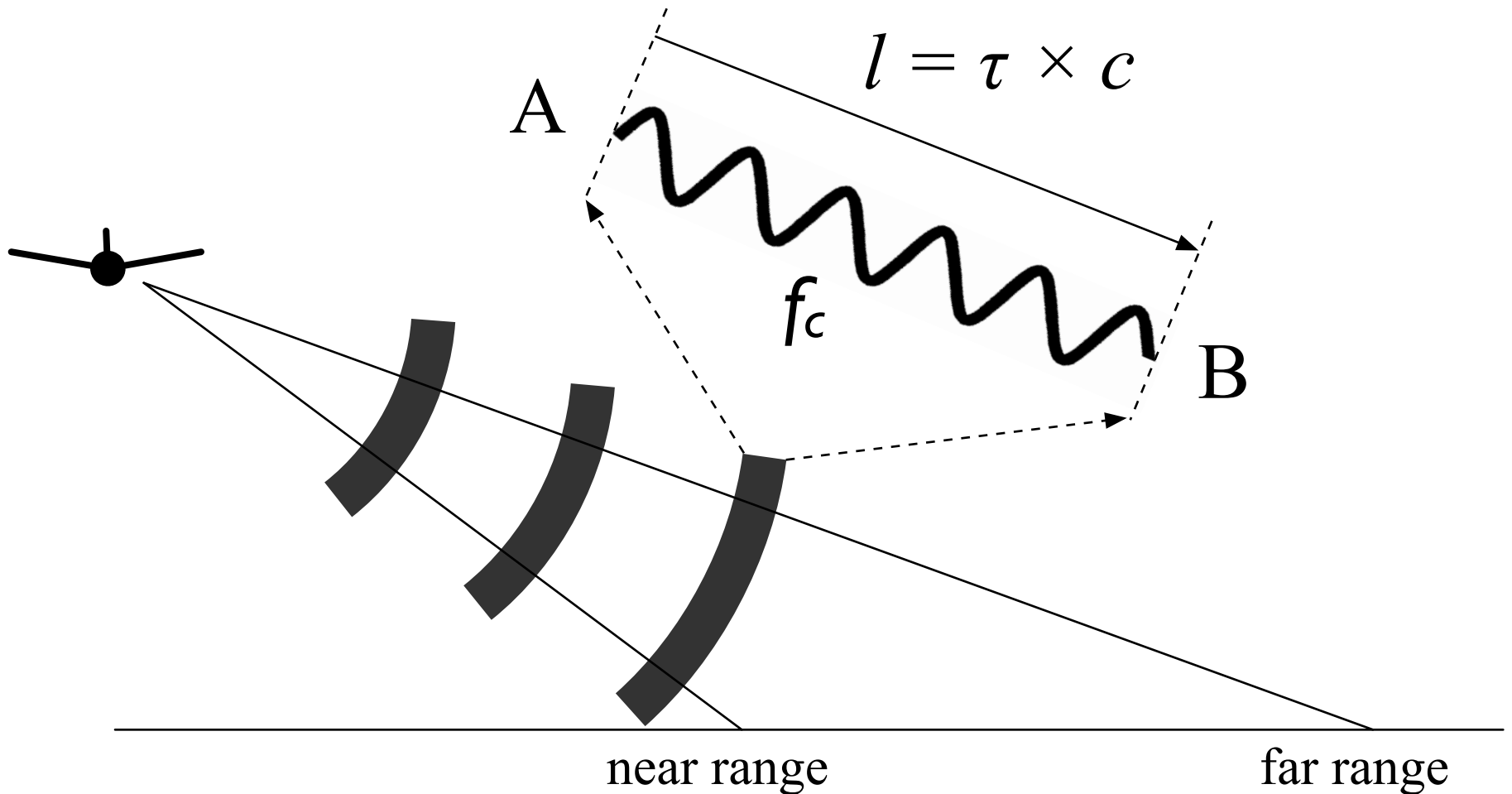


(a) Propagation of one radar pulse (indicating the wavefront location at time intervals 1-17)

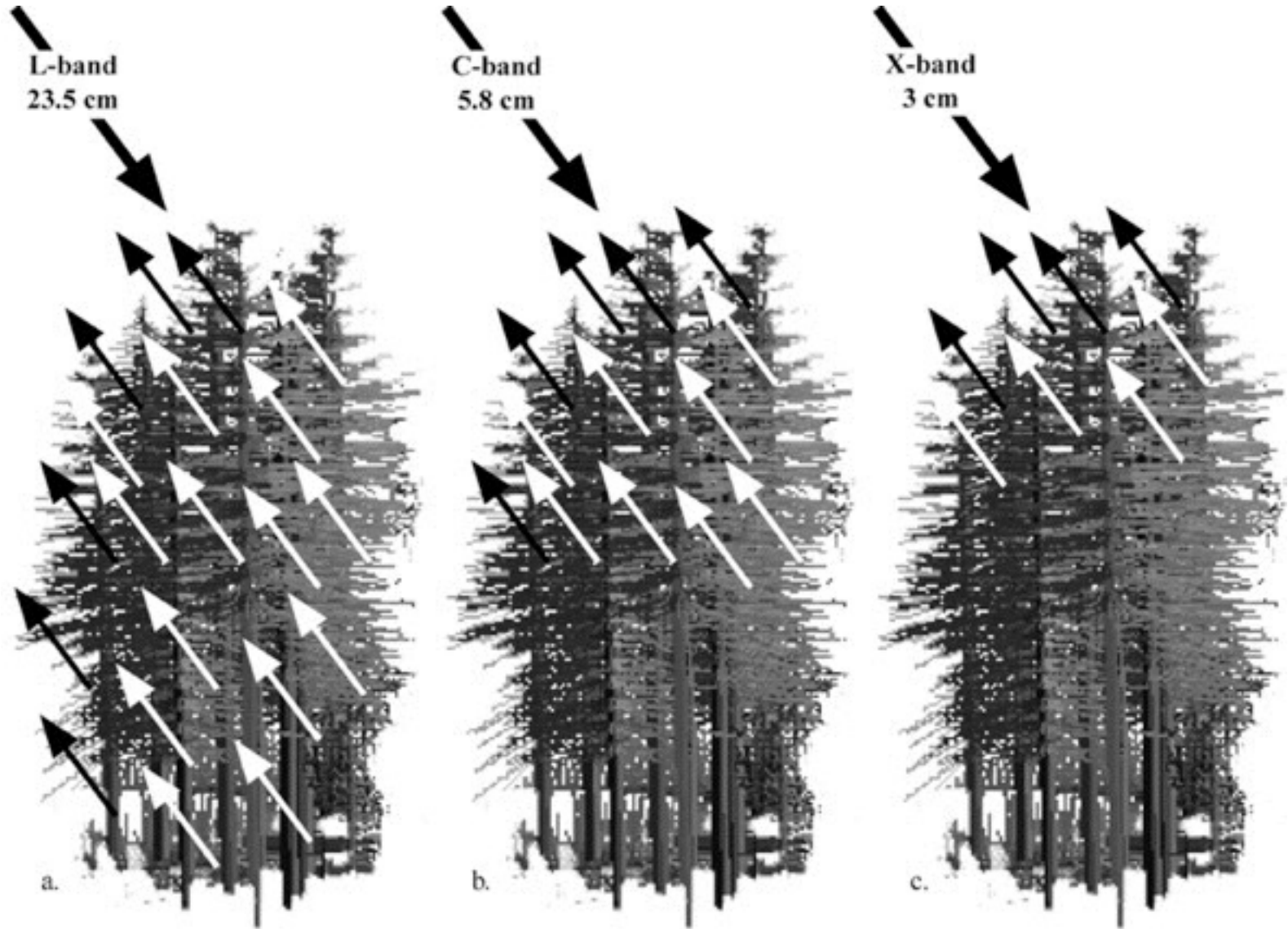


# レーダー観測システム

$f_c$  (instrument's oscillator frequency)



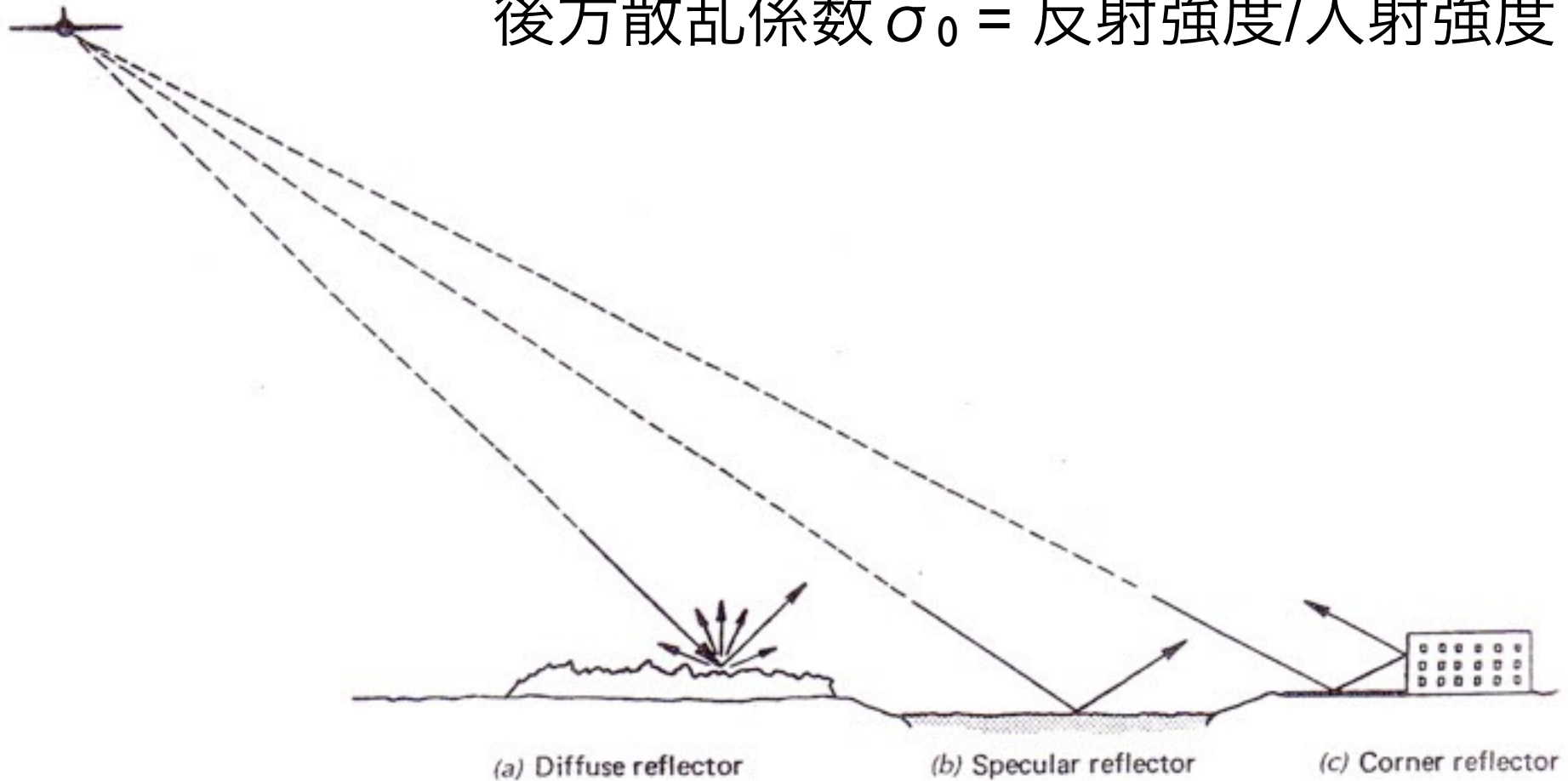
# マイクロ波レーダー反射の波長依存性





# マイクロ波レーダーの反射強度

後方散乱係数  $\sigma_0 = \text{反射強度} / \text{入射強度}$

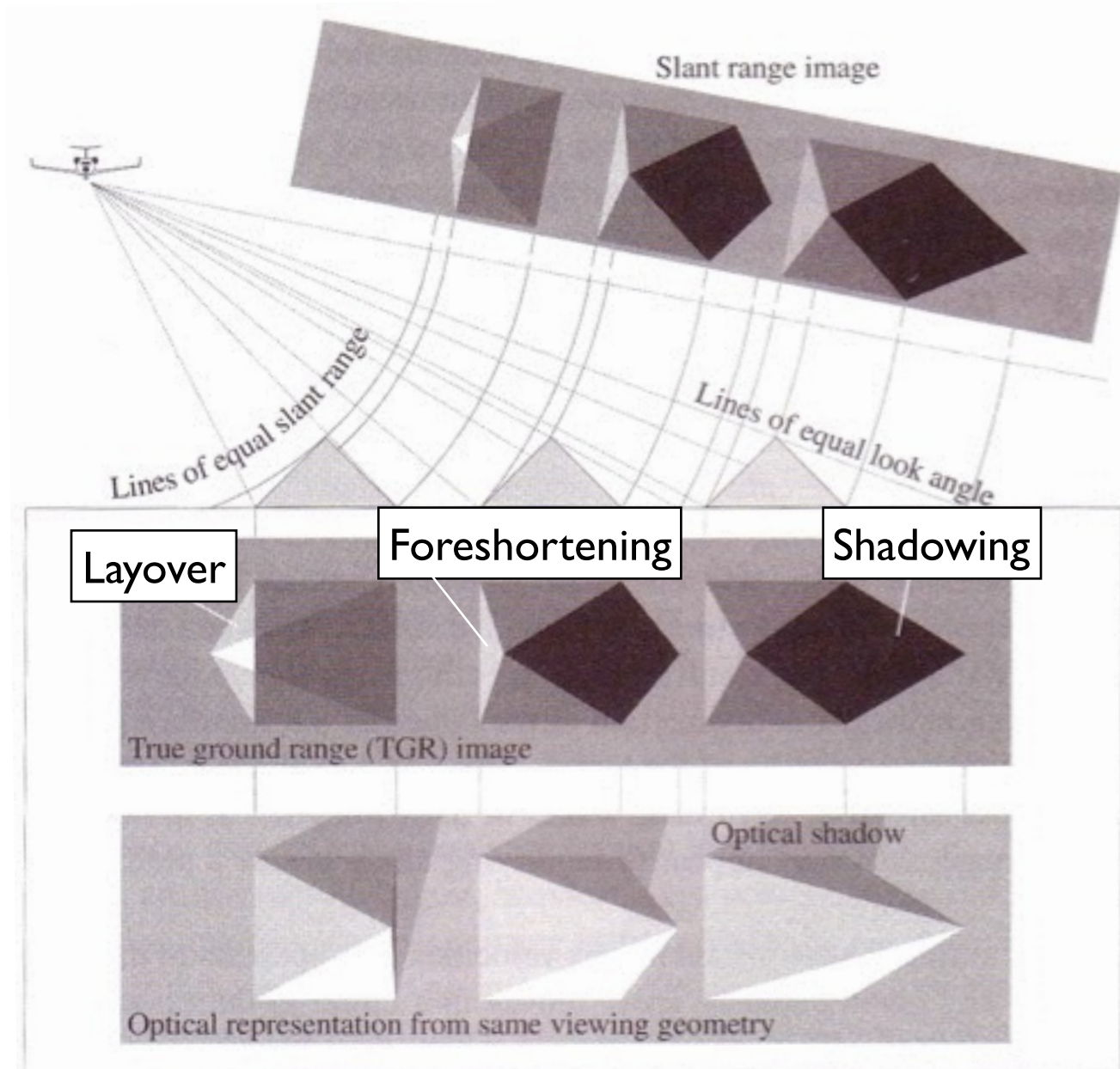


$\sigma_0$ : 微弱

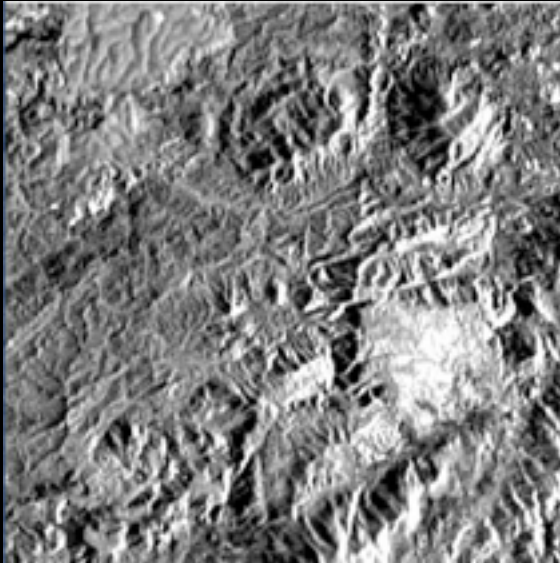
$\sigma_0$ : なし

$\sigma_0$ : 強

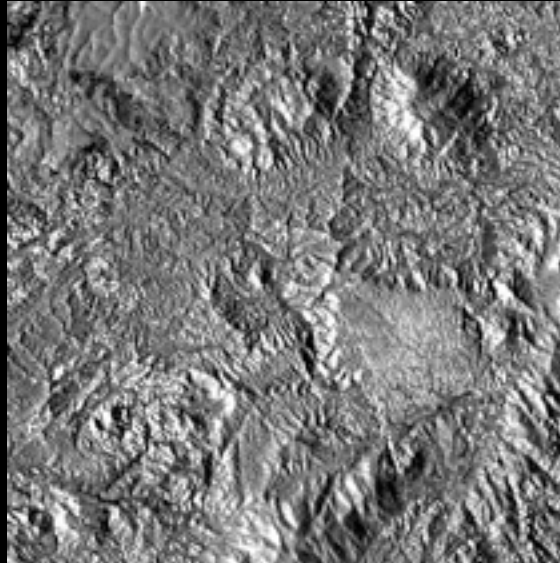
# レーダー画像の幾何学



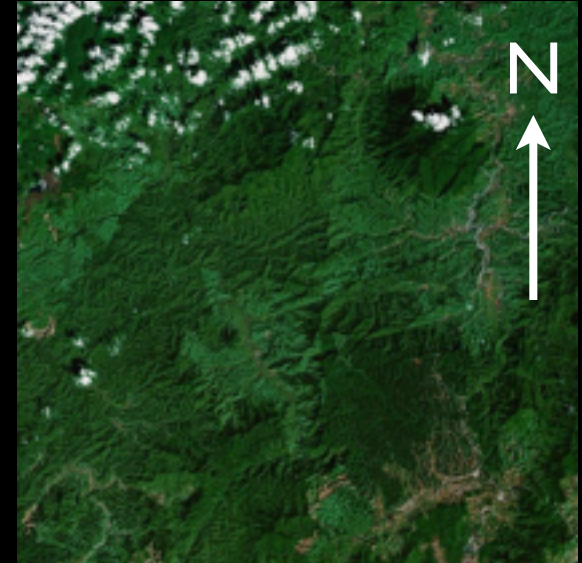
# レーダー照射方向



JERS-1 SAR



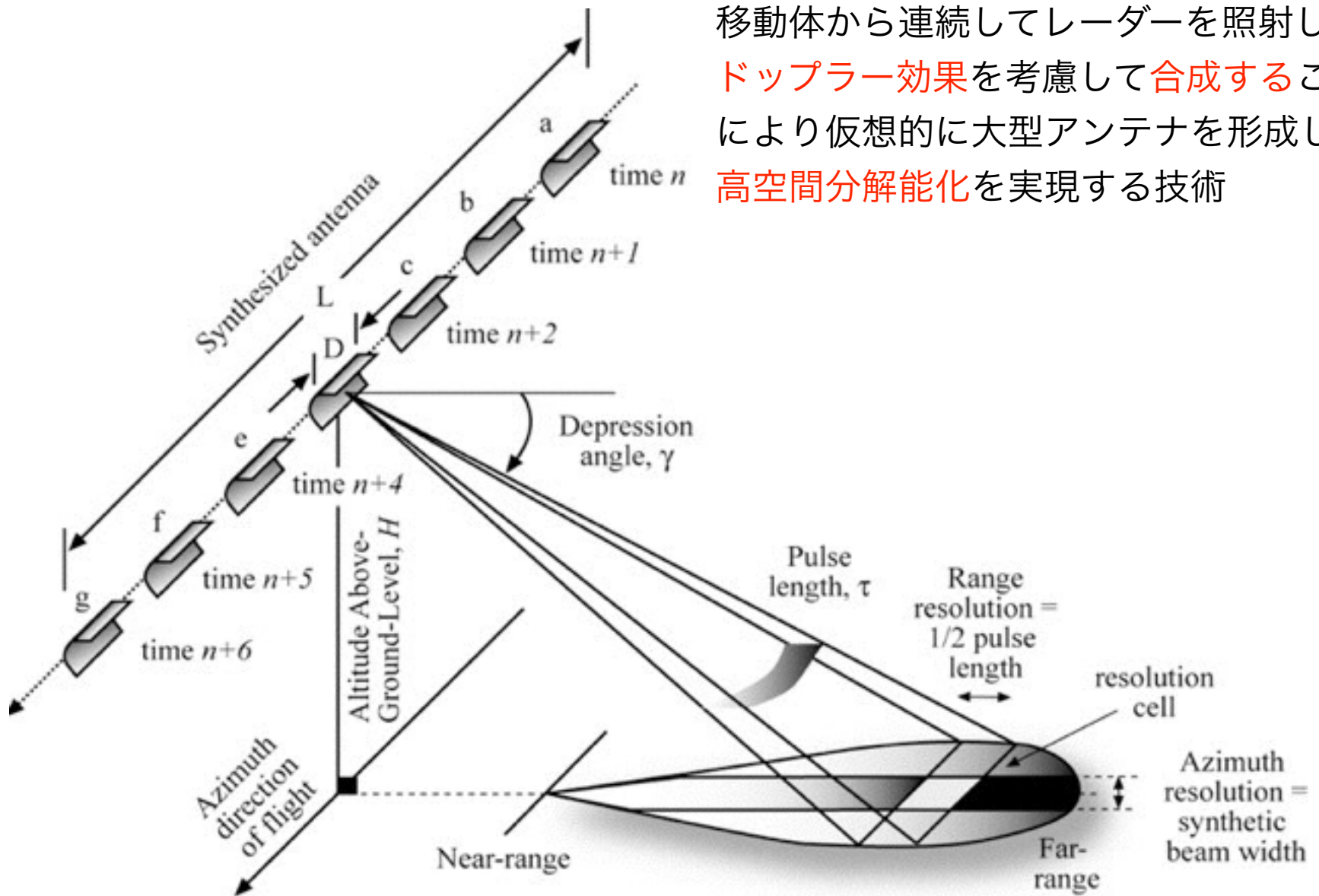
ALOS PALSAR



Landsat ETM

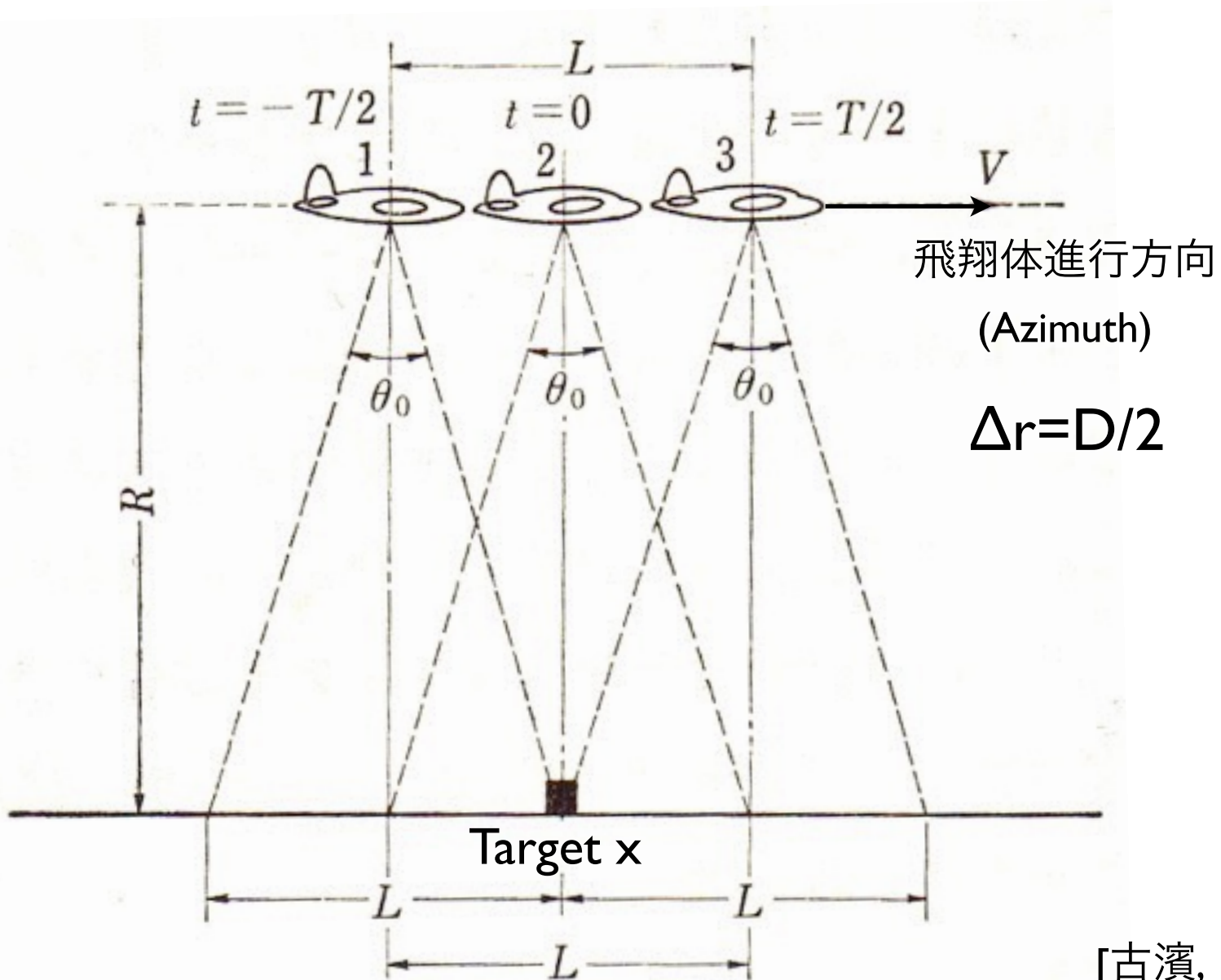
起伏の激しい地域ではフォアショートニングと  
シャドウィング現象が支配的になる

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

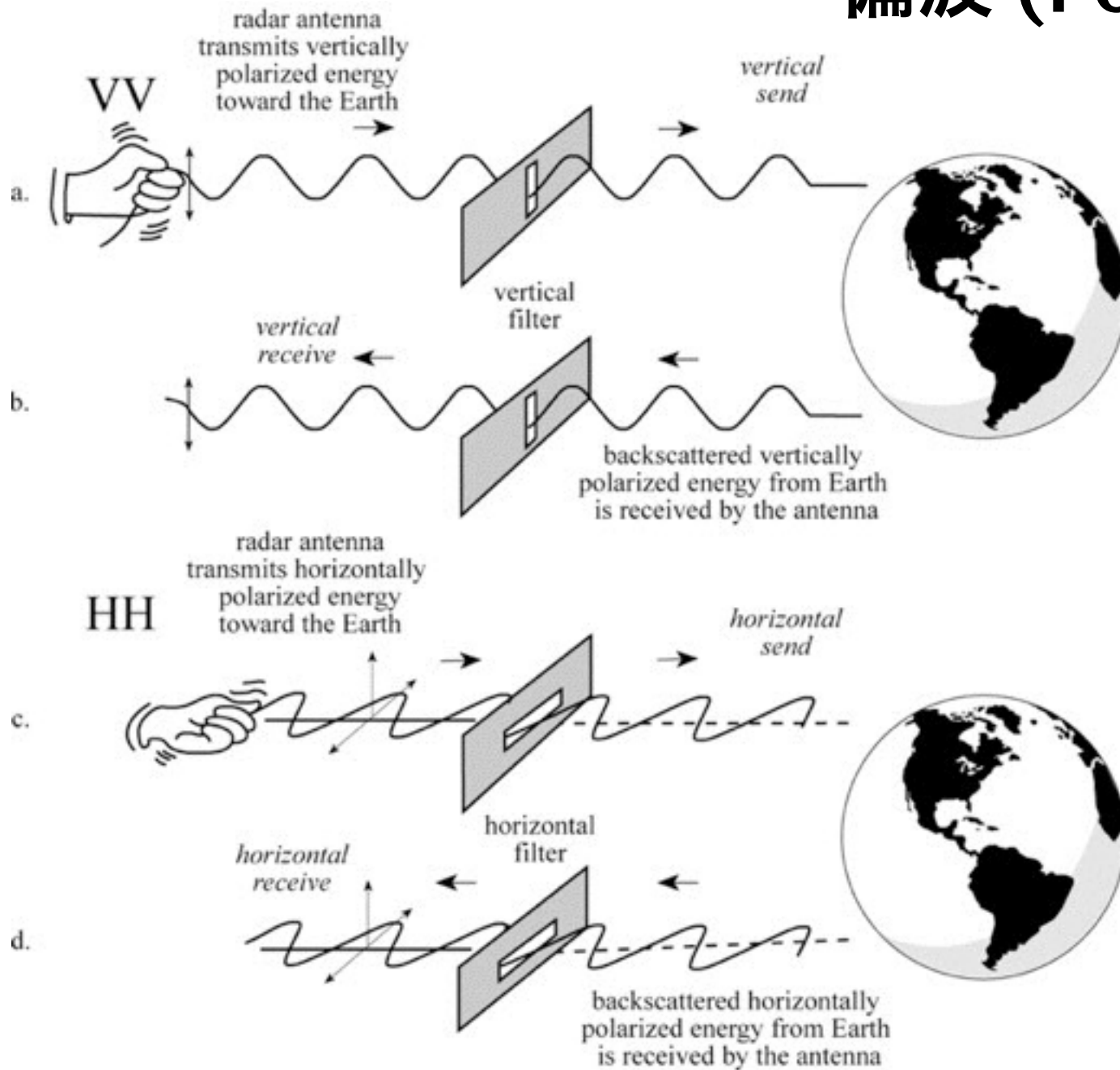


移動体から連続してレーダーを照射し、**ドップラー効果**を考慮して**合成**することにより仮想的に大型アンテナを形成し**高空間分解能化**を実現する技術

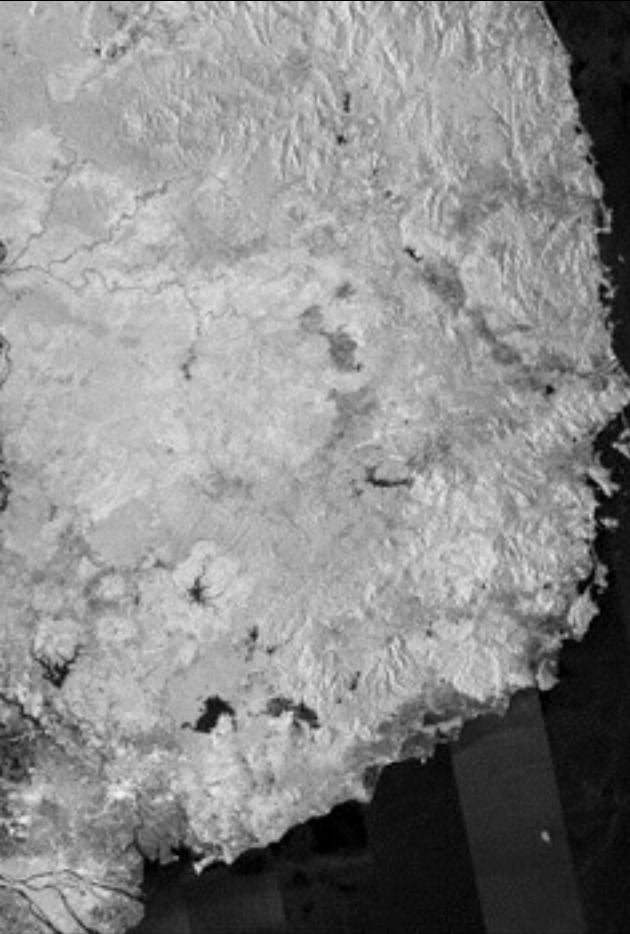
# 合成開口レーダーの原理



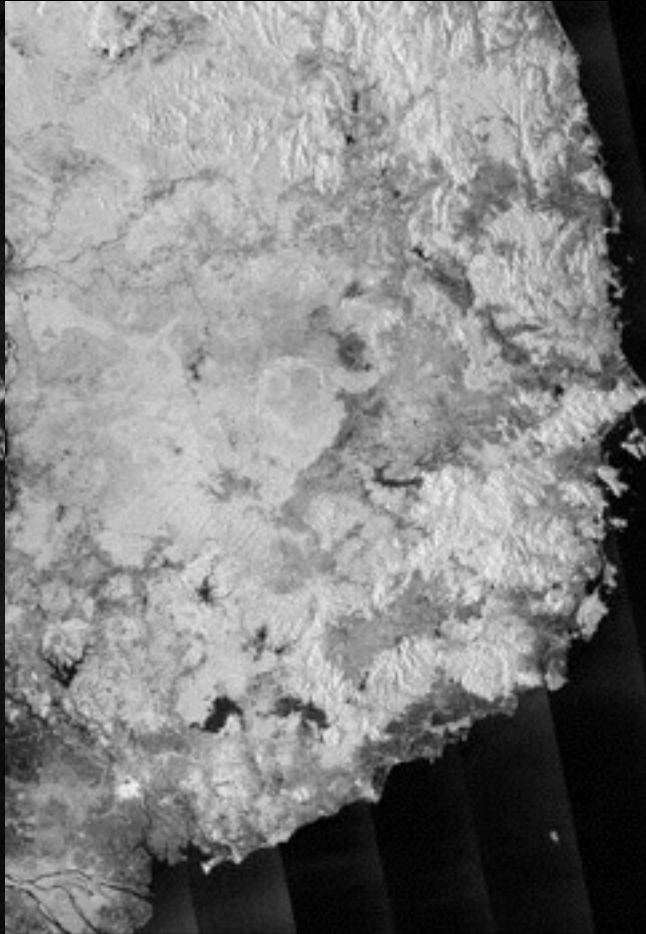
# 偏波 (Polarization)



# レーダー偏波



HH



HV

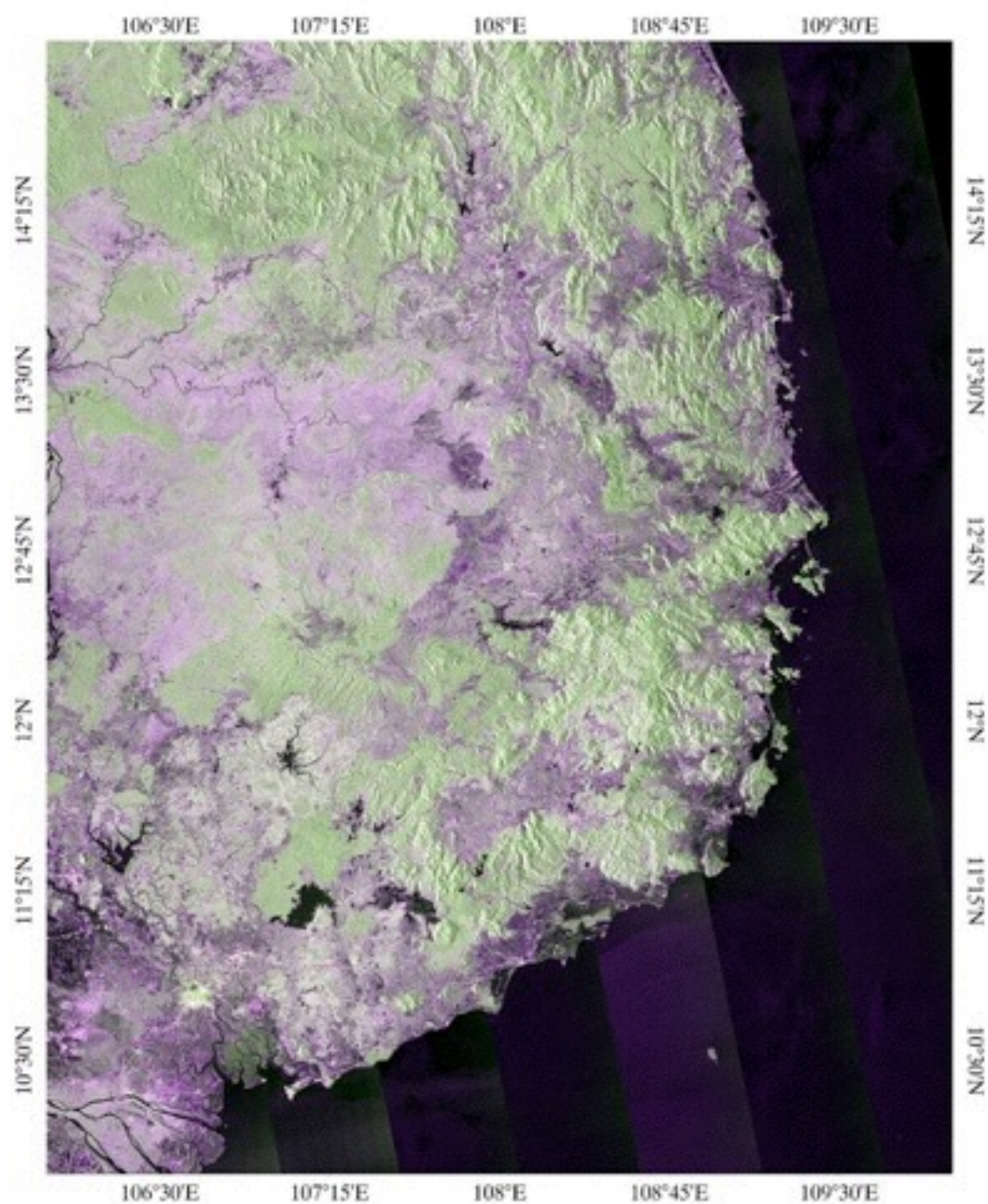


HH-HV

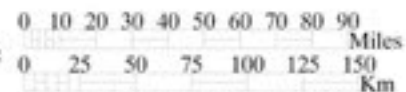
# ALOS PALSAR 2007 in highland Vietnam

森林は緑，水域は黒，農地は  
紫に見える。

森林では，草地や裸地に比べて  
地上部構造が大きく，交差  
偏波(HV)成分が卓越する。



RGB=HH:HV:HH-HV



R:G:B=HH:HV:HH-HV

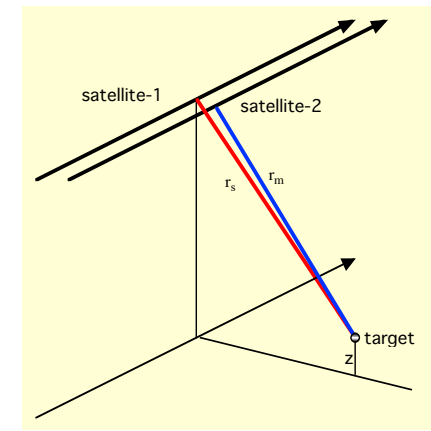


# インターフェロメトリー (InSAR)



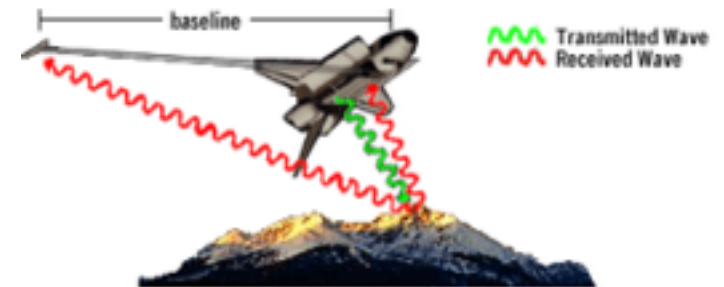
🍏 わずかに異なる2つの軌道から得られる観測情報を利用する

- 🍏 高さheight ( $z$ )
- 🍏 地表面の変化 ( $dz/dt$ )
- 🍏 大気の遅延



🍏 二つの手法が用いられる

- 🍏 異なる軌道による観測
- 🍏 同軌道の2センサ同時観測



# コヒーレンスと位相差



## Coherence

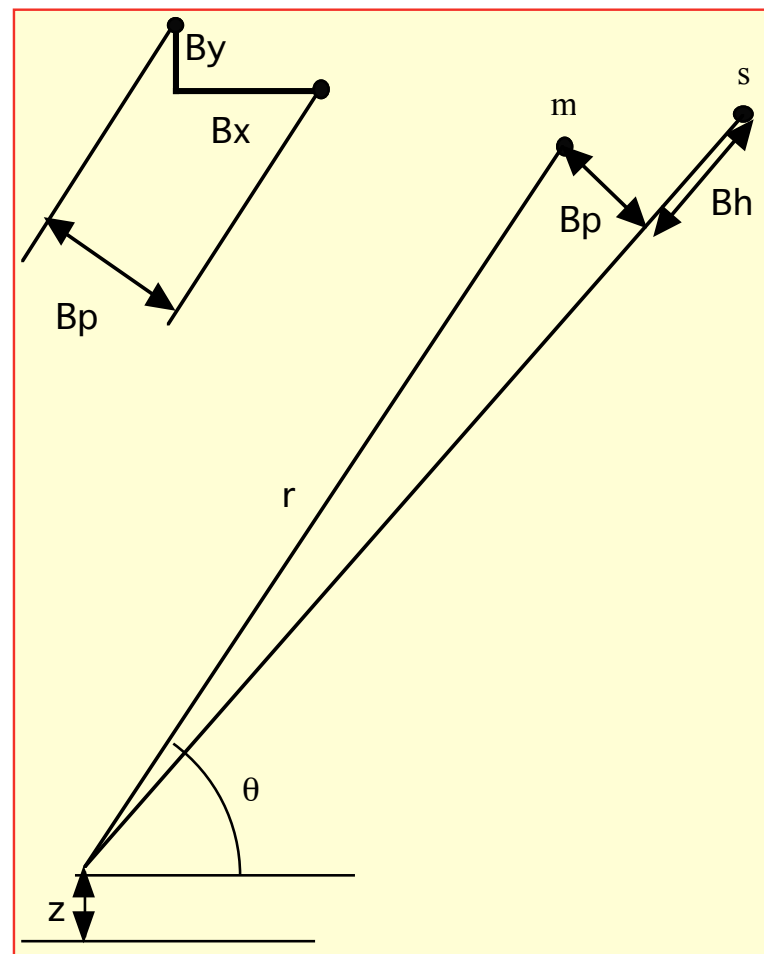
$$\gamma = \frac{\langle \mathbf{s}_m \cdot \mathbf{s}_s^* \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{s}_m \cdot \mathbf{s}_m^* \rangle \langle \mathbf{s}_s \cdot \mathbf{s}_s^* \rangle}}$$

$$\gamma = \gamma_{thermal} \cdot \gamma_{spatial} \cdot \gamma_{temporal}$$

## Phase difference

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{B_p \cdot z}{r \cdot \sin\theta} + B_h + dz \right) + \phi_a$$

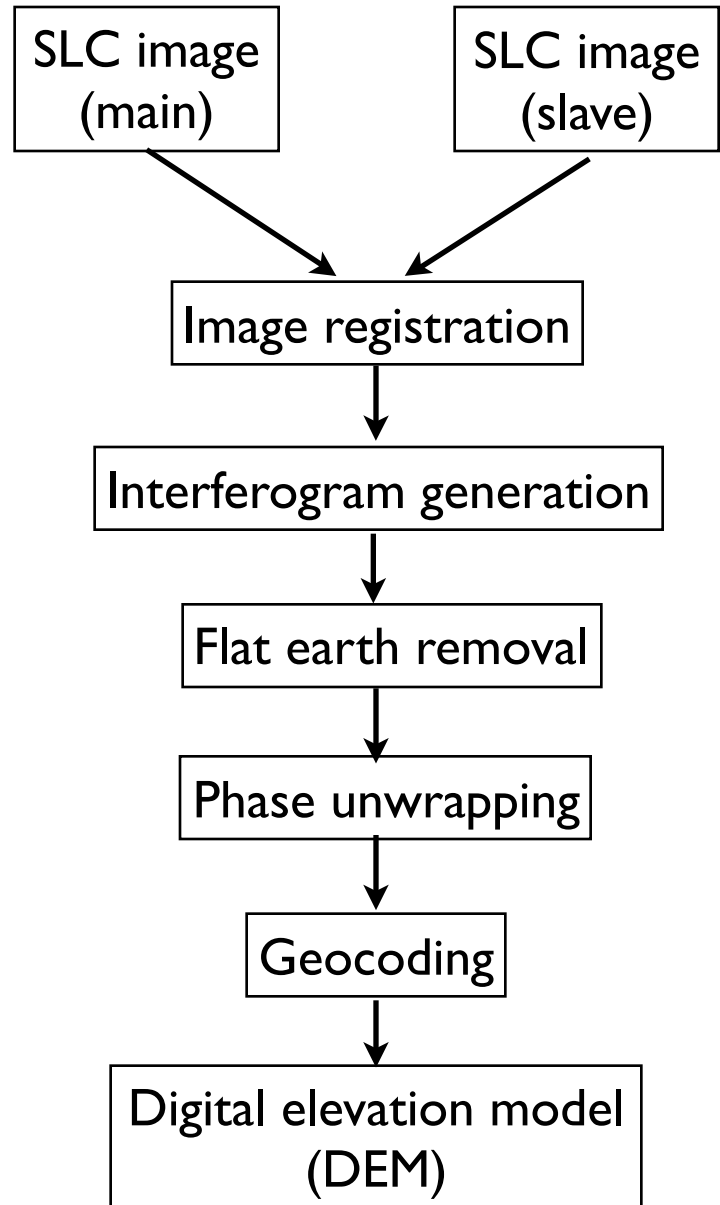
$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{2N\gamma^2}}$$



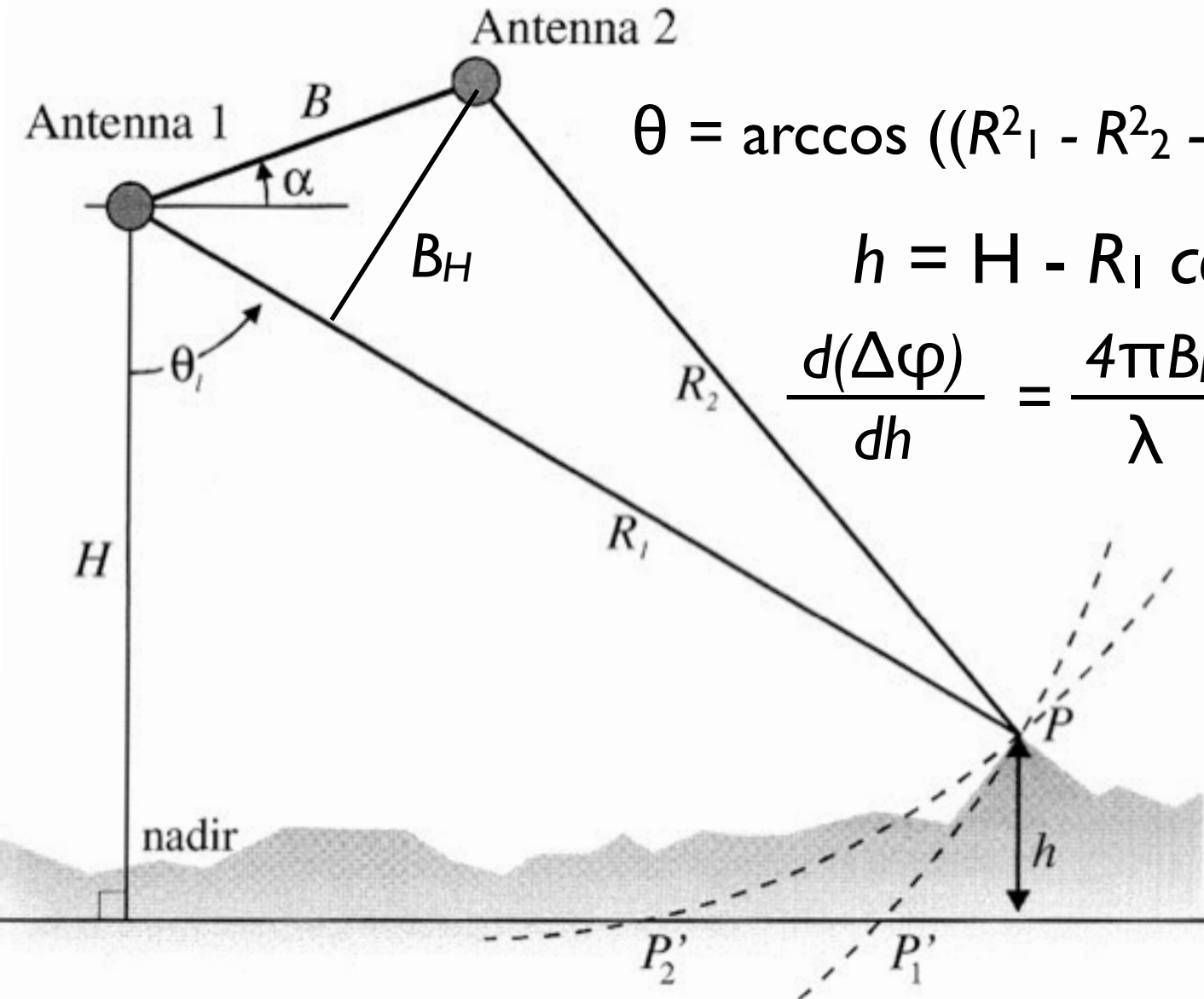
Coordinate system

# InSAR処理の流れ

- 🍏 Data reading
  - 🍏 Two Single look complex (SLC) images with intensity and phase
- 🍏 Image registration
- 🍏 Interferogram
  - 🍏 interferogram and coherence image
- 🍏 Flat earth removal
  - 🍏 remove stripe from orbit
- 🍏 Phase unwrapping
  - 🍏 Compensate for  $2\pi$  phase angle
- 🍏 Geocoding
  - 🍏 interferogram into height



# SARステレオ観測の幾何学



$$\theta = \arccos \left( \frac{R_1^2 - R_2^2 - B^2}{2R_2B} \right) + \alpha$$

$$h = H - R_1 \cos \theta$$

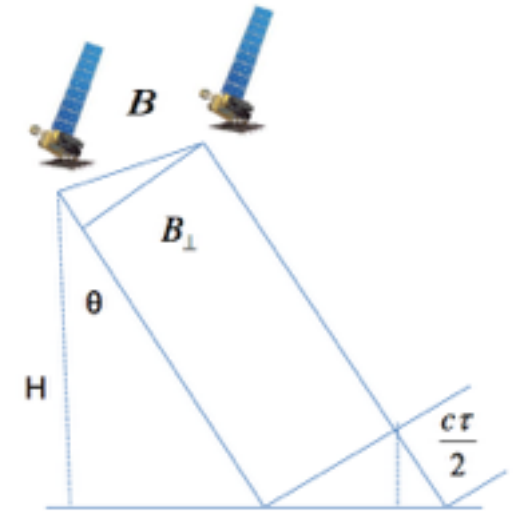
$$\frac{d(\Delta\varphi)}{dh} = \frac{4\pi B_H}{\lambda} \frac{1}{H \tan \theta}$$

# ベースラインの決定

Phase difference depends on

- 1) satellite height (H)
- 2) incidence angle ( $\theta$ )
- 3) baseline ( $B_H$ ) (distance between satellites)

$$\frac{d(\Delta\varphi)}{dh} = \frac{4\pi B_H}{\lambda} \frac{1}{H \tan\theta}$$



Phase difference with respect to slant range resolution ( $c\tau/2$ ) is smaller than  $2\pi$

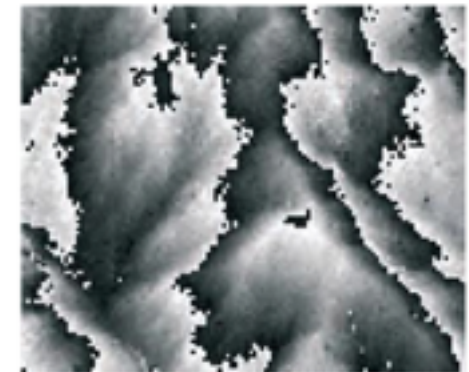
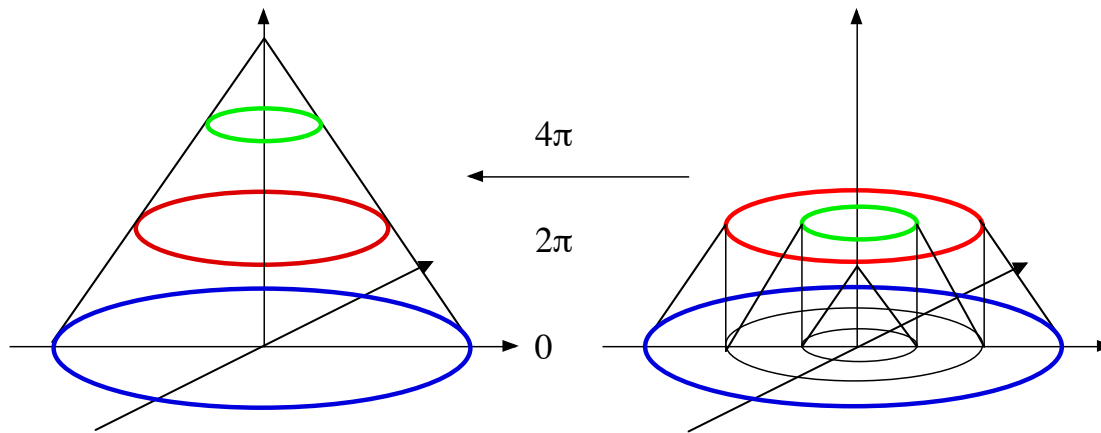
Critical baseline

$$B_H = \frac{\lambda H}{c\tau} \frac{\tan\theta}{\cos\theta}$$

Incidence angle  $\theta$  in decimal degrees

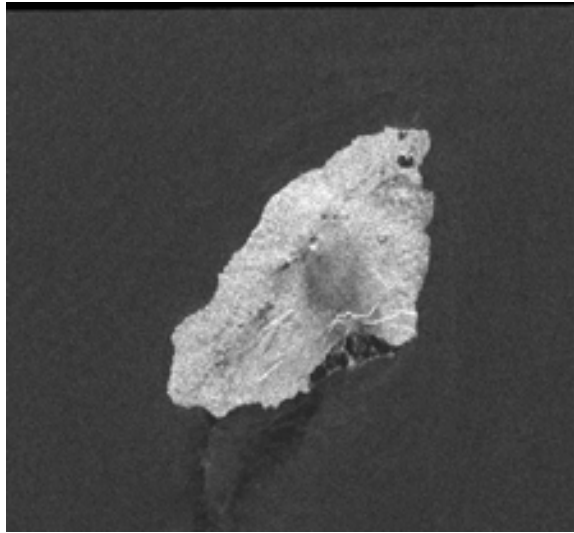
入射角	23度	34度	41度
ERS/ENVISAT 16 MHz	1.1 km	2.0 km	2.9 km
ALOS FBD 14 MHz	3.6 km	6.5 km	9.6 km
ALOS FBS 28 MHz	7.3 km	13.1 km	18.6 km

Continues the wrapped phase ( $-\pi$  to  $\pi$ ) to unwrapped phase

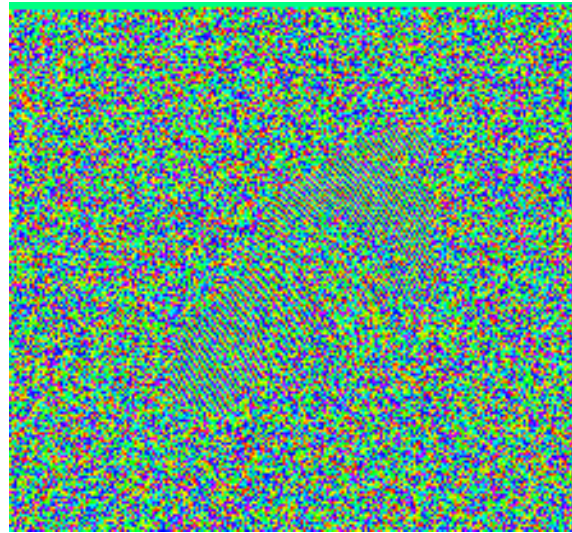


Method: branch cut, the least square method

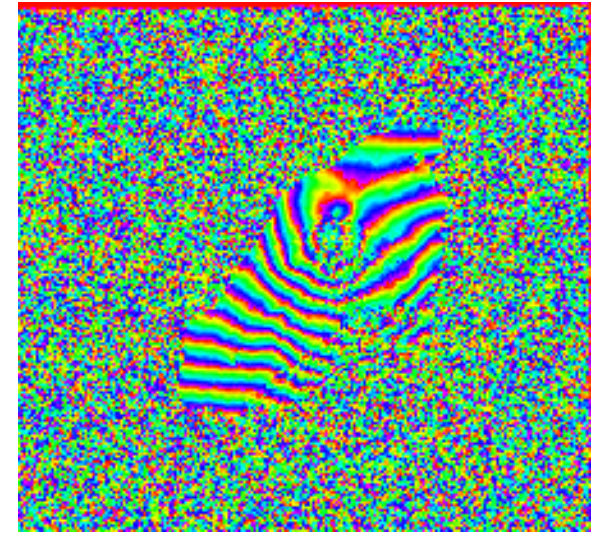
# InSAR処理の過程で得られる画像



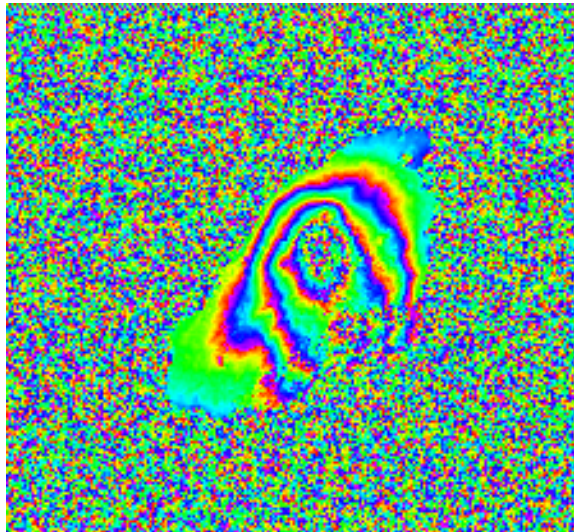
Master SLC



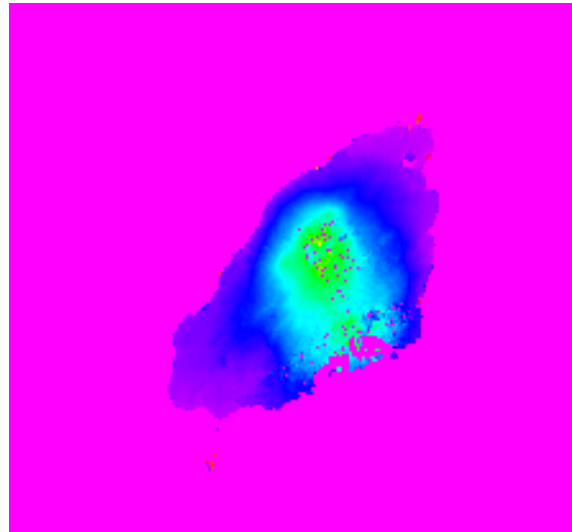
Interferogram



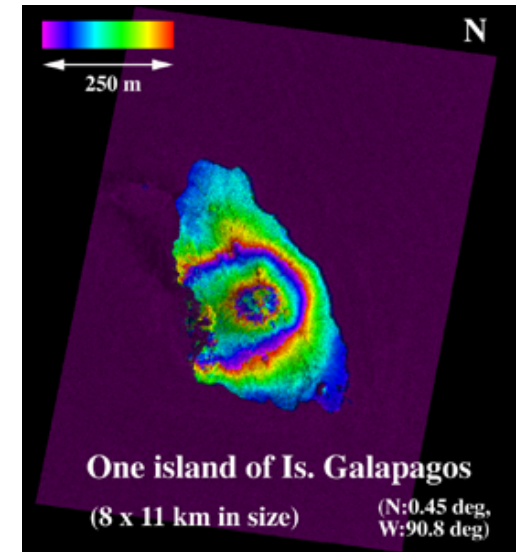
Flat earth removal



Phase unwrapping

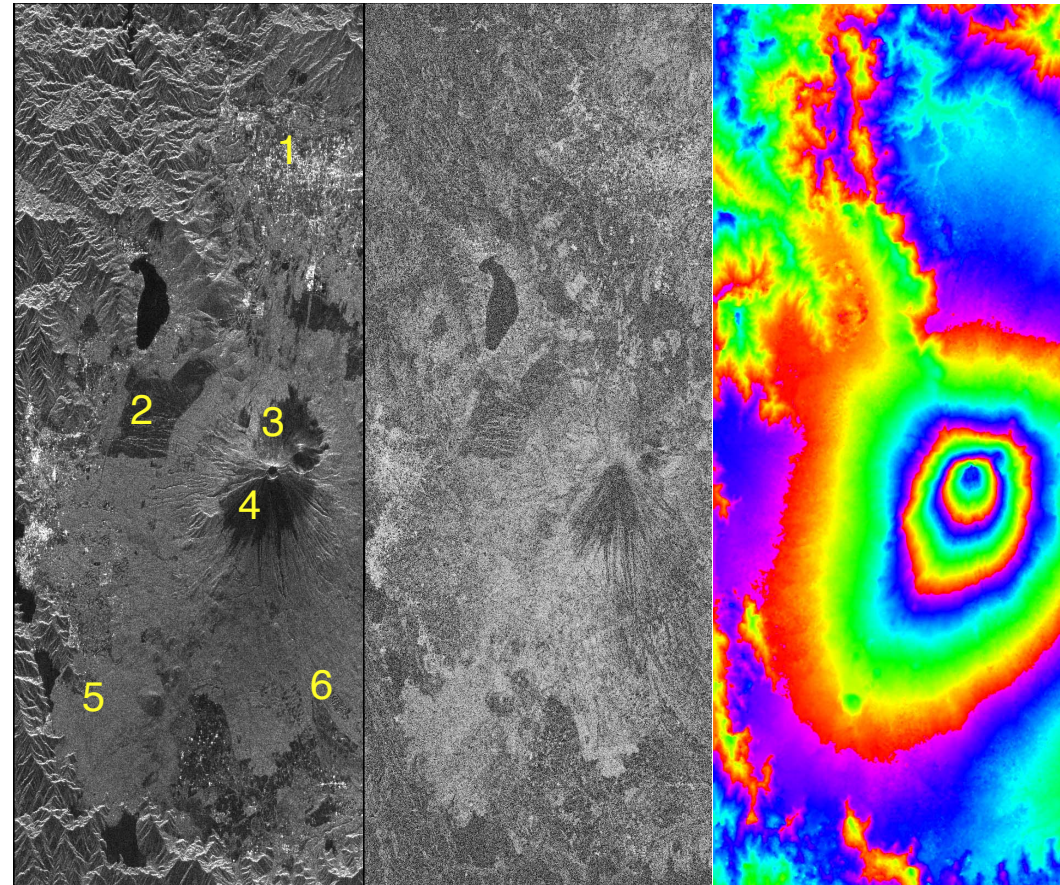
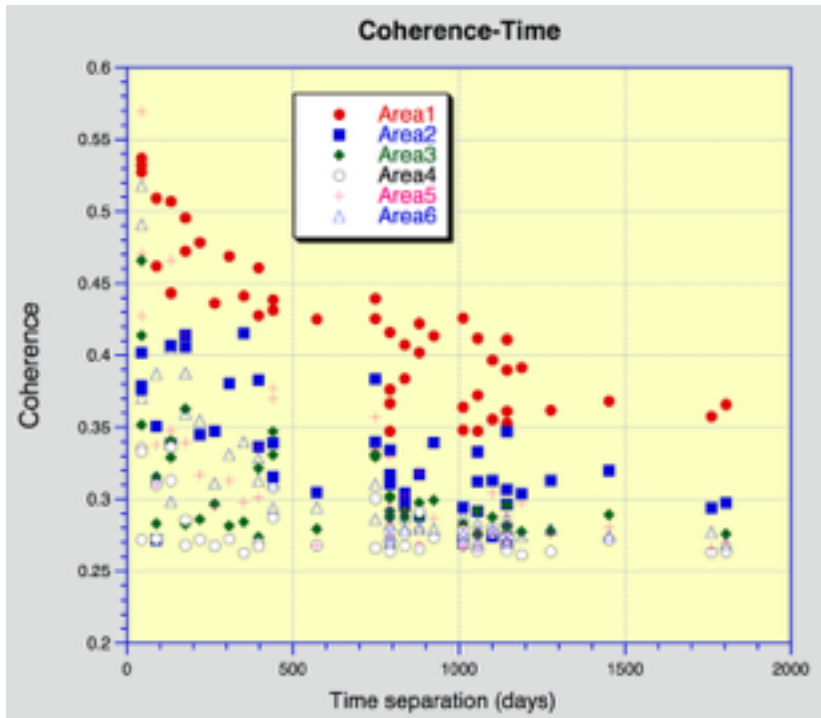


DEM



InSAR

# Coherences at Mt. Fuji

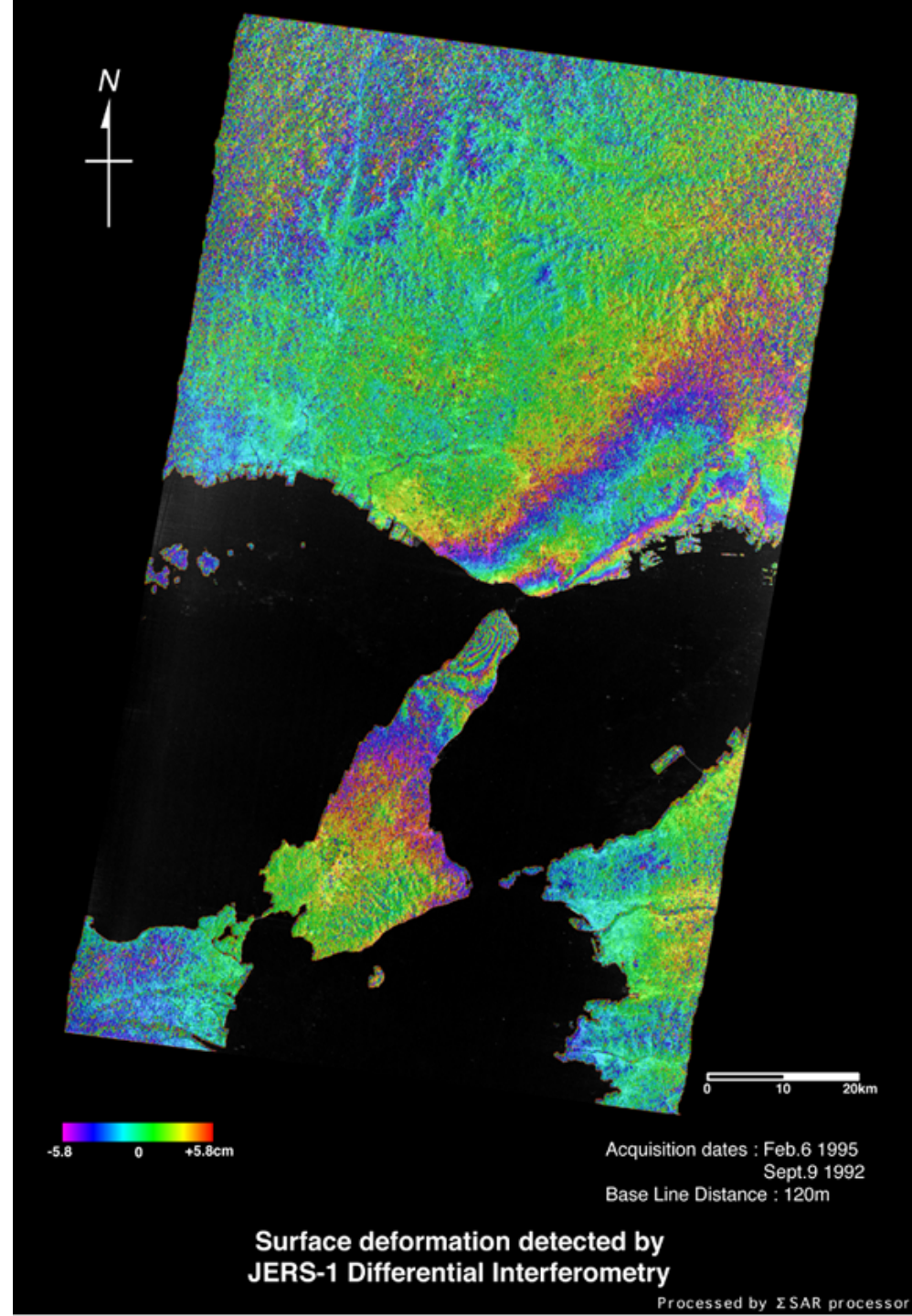


Measure coherences of several different targets as functions of time separation and baseline.



# Surface Deformation measured by JERS-1 Differential InSAR

Master:Feb.  
6.1995  
Slave:Sept.  
9.1992

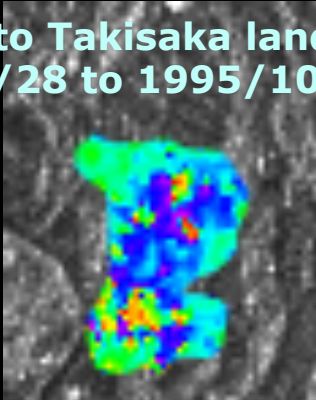


[Shimada, 1997]

# Land slide monitoring

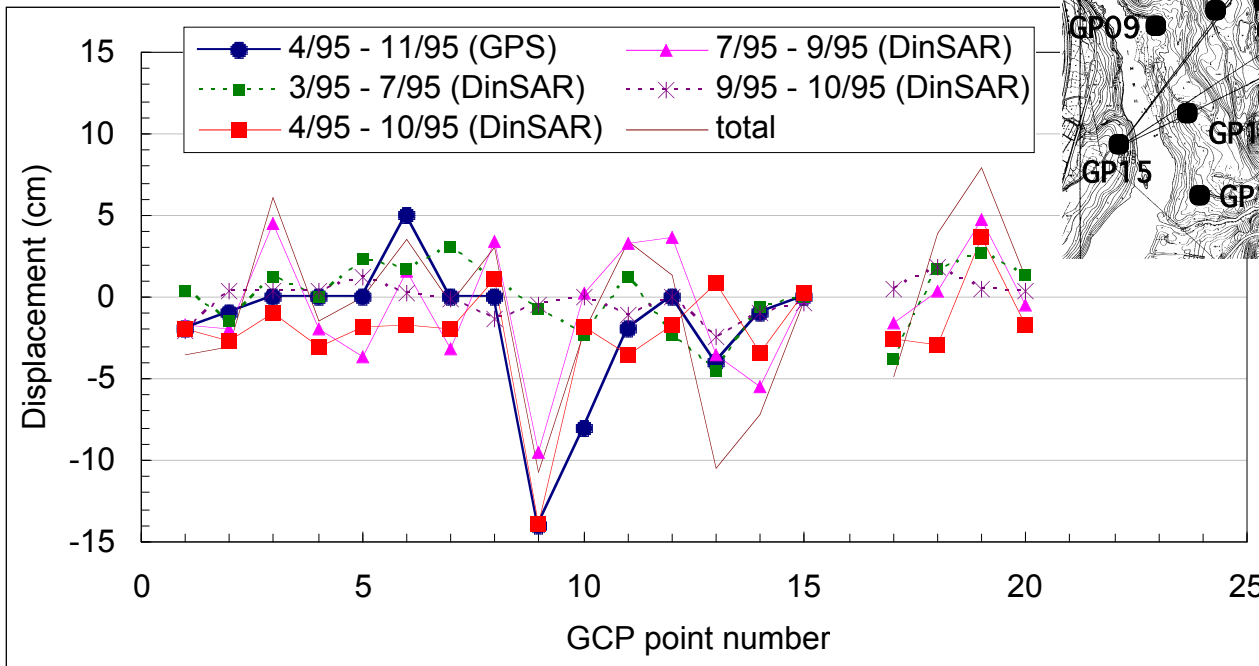
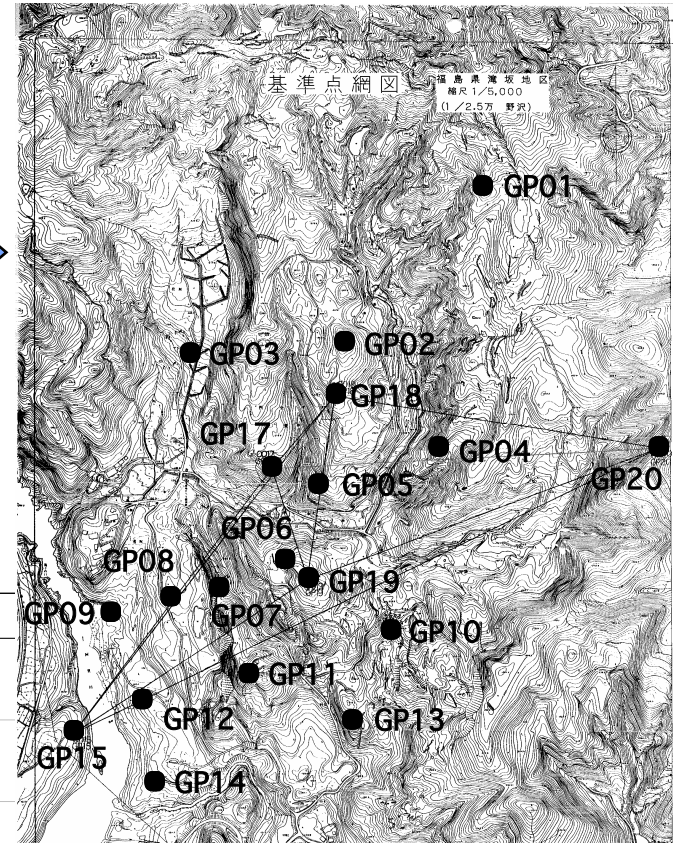
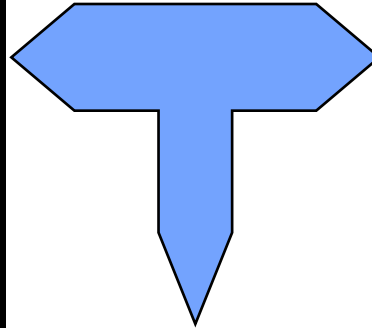
## Comparison between DInSAR and GPS

Analysis to Takisaka landslide from 1995/04/28 to 1995/10/21



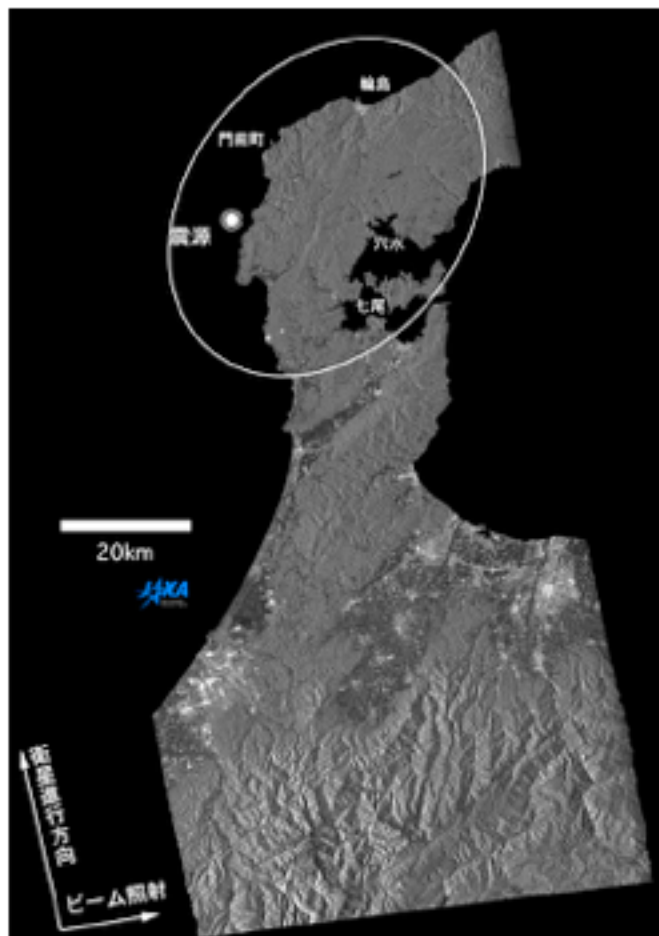
-5.9cm

5.9cm

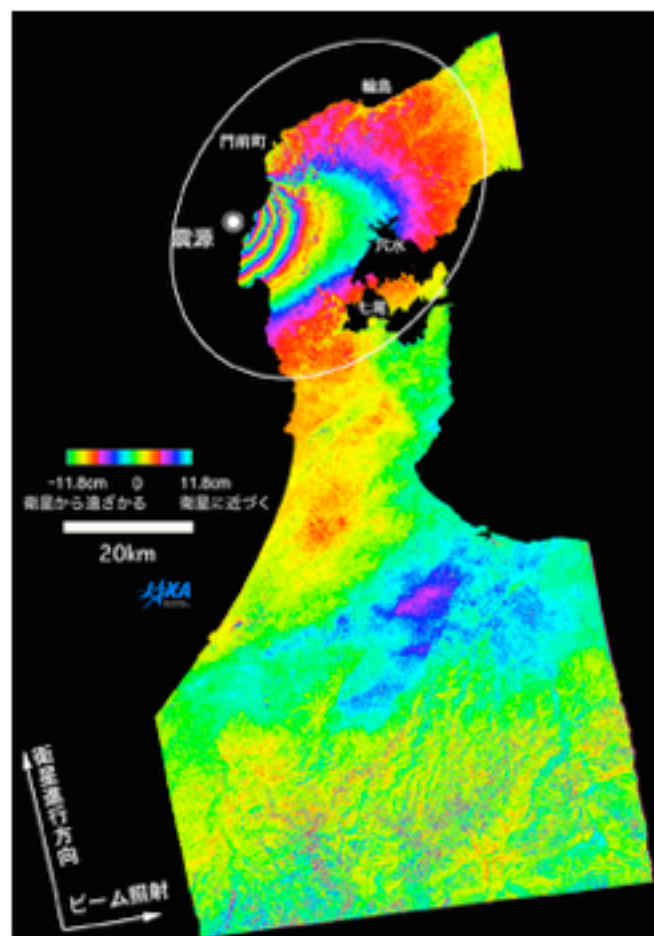


After Furuta et al.

# PALSARで観測した地震地殻変動パターン



ALOS/PALSAR



ALOS/InSAR

2007年3月25日  
能登半島地震

地表からセンサまでの距離を測る

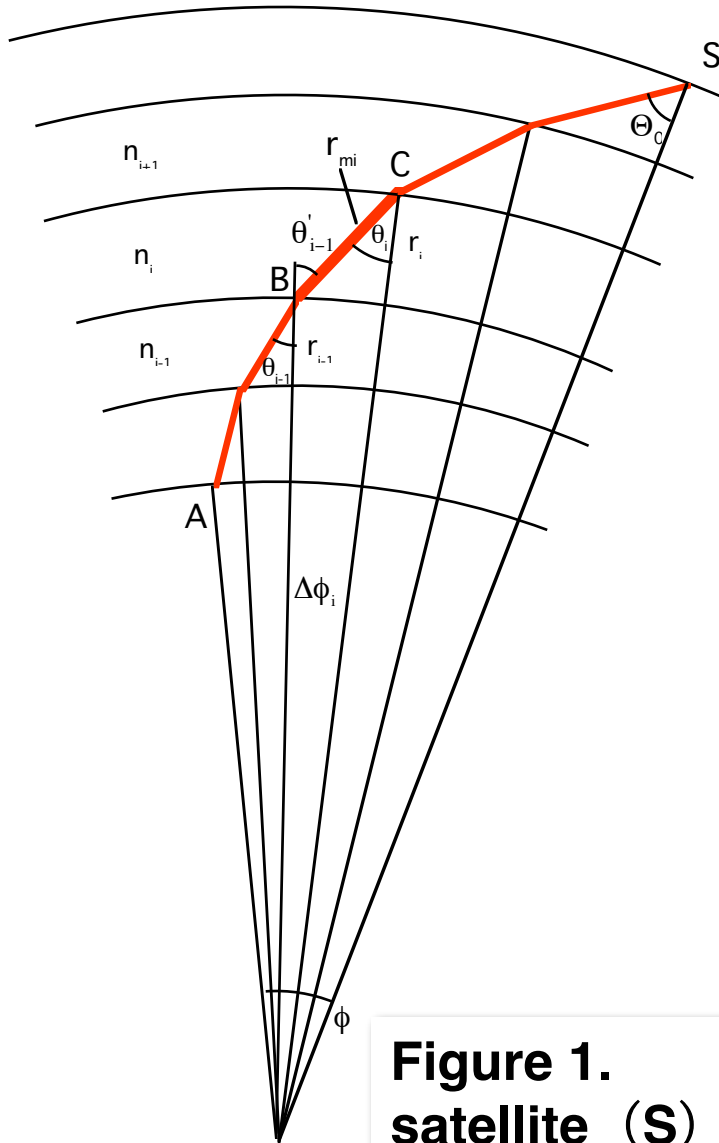
地震前後の取得画像を比較し隆起や陥没による地殻変動の観測が可能  
(干渉差分処理)

[JAXA/EORC]



- 🍏 Decorrelation
  - 🍏 requires enough coherence
- 🍏 Co-registration
  - 🍏 DEM Height accuracy, Variation of the height
- 🍏 Orbital error
  - 🍏 Along track, Cross track
- 🍏 Miscellaneous
  - 🍏 **Water vapor**, Foreshortening, Layover, shadowing
- 🍏 Unwrapping

# SARデータにおける放射伝達と大気の遅延



- **Signal propagation on curve**

- **Light speed changes with refractive index (Dry and Wet Component)**

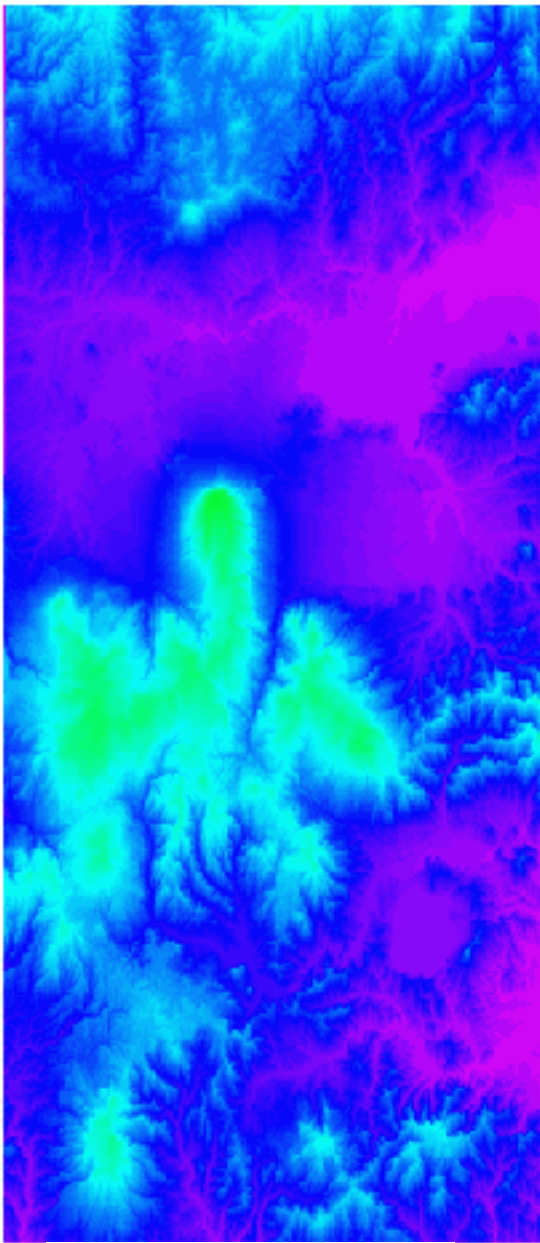
- **Total length changes  $\sim m$**

- **Dry comp.** Large scale change

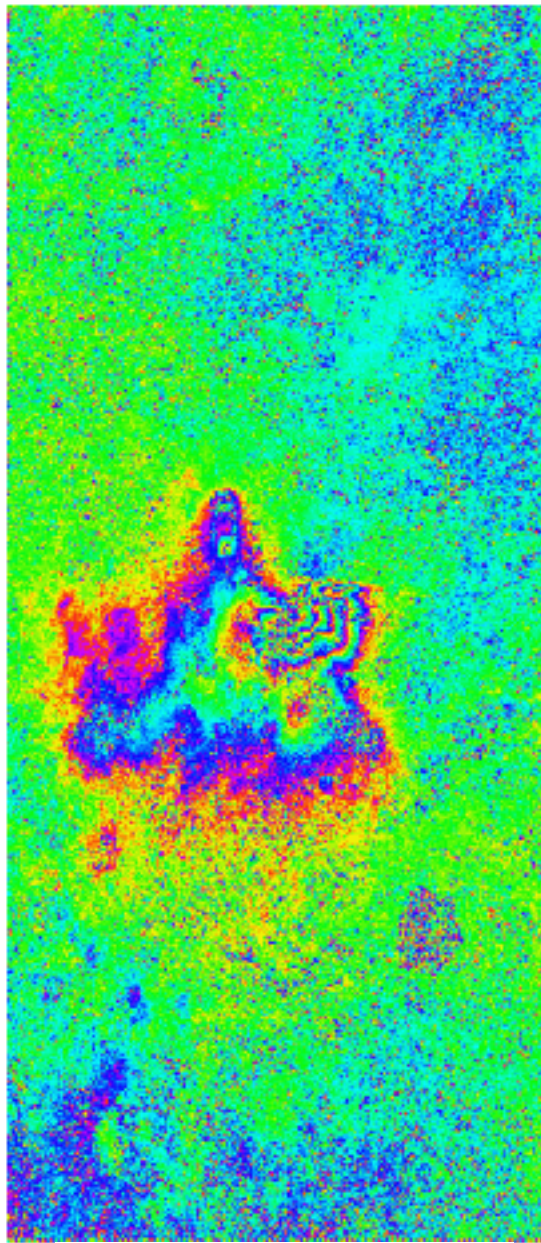
- **Wet comp.** Small scale change

$$n = 1 + \frac{77.6}{T} p \cdot 10^{-6} + \frac{0.373}{T^2} e$$

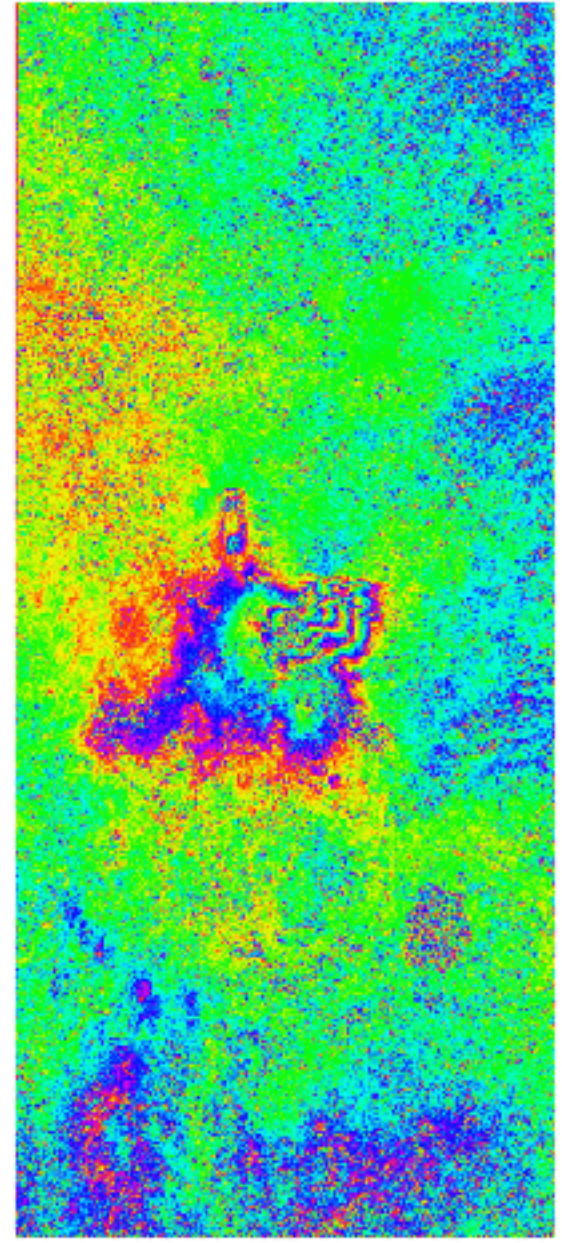
**Figure 1.** Signal propagation path between the satellite (S) and the target (A).



Water vapor



No correction



With correction

# PSInSARにおける幾何学と画像処理の流れ

a)それぞれのPSの相対的な高さは、衛星軌道の基準線(ベースライン)基準線に関する位相干渉の線形回帰によって推定される。

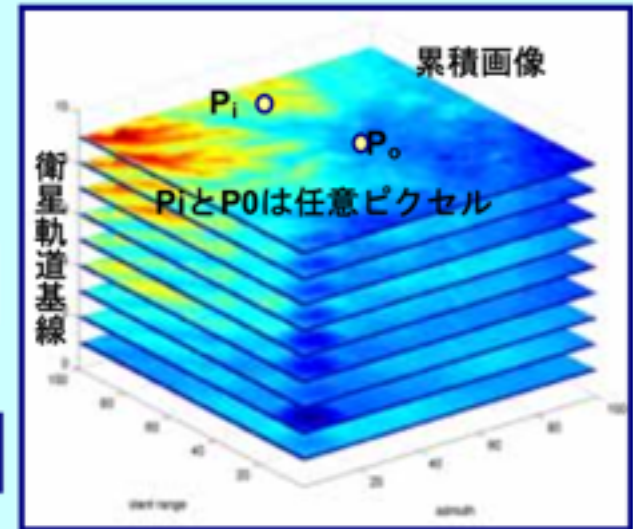
b)それぞれのPSの相対的な直線的な変動構成要素は、時間に関して位相干渉直線回帰によって推定される。

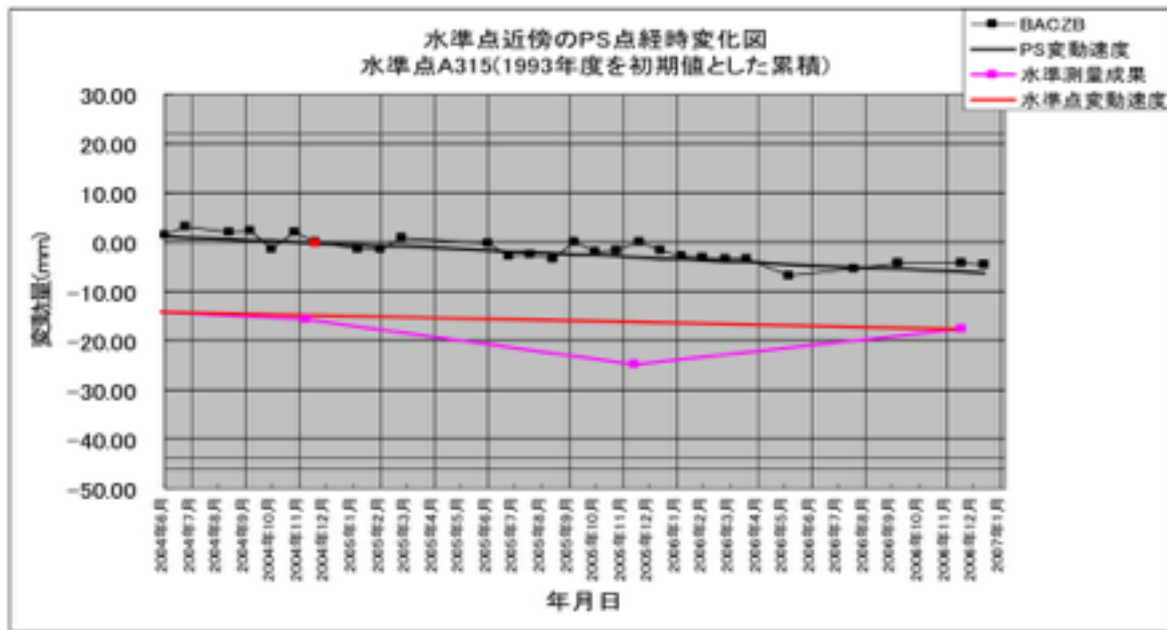
c)それぞれのPSの残留位相(差分干渉)は、大気、散乱、幾何学的な非相関、時間変化による結果である。

1m以下の精度補正

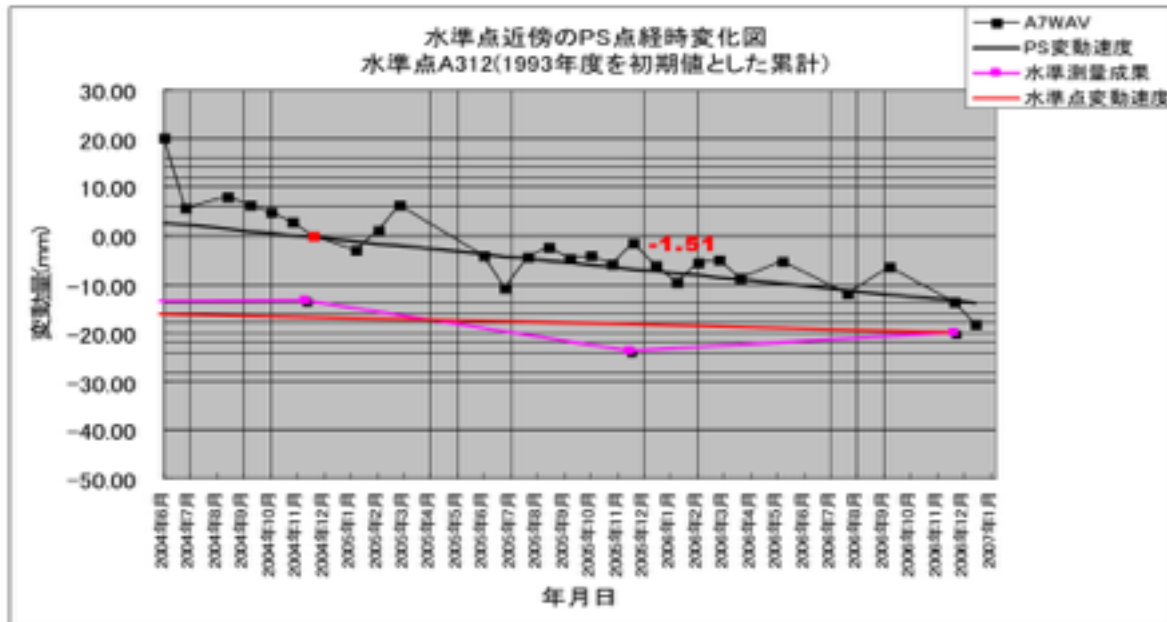
mm単位の精度補正

PS = 僅かな残留位相





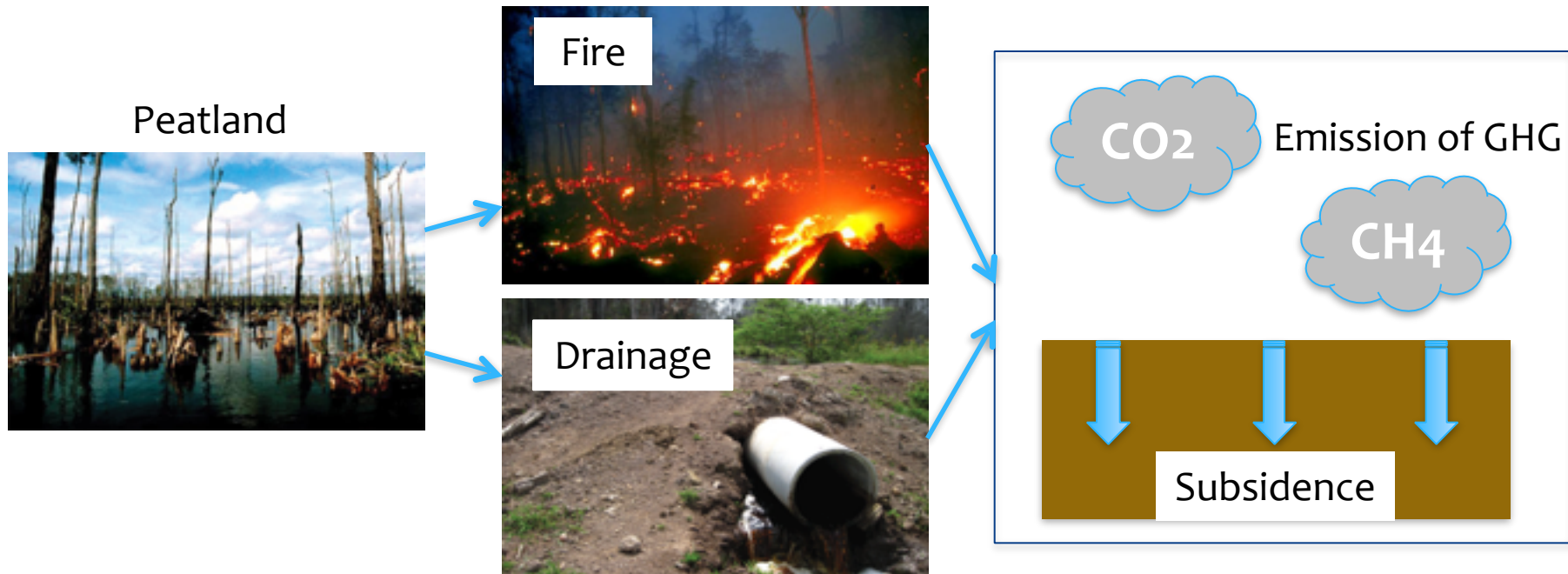
## 愛知県犬山市の地盤沈下の計測例





# インドネシアの泥炭森林での地盤沈下

- \* Peatland is a kind of wetlands with thick waterlogged organic soil layer storing large amount of carbon.
- \* Peatland is the home of endangered species, and has the function of carbon sink.



# インドネシア ジャンビ州

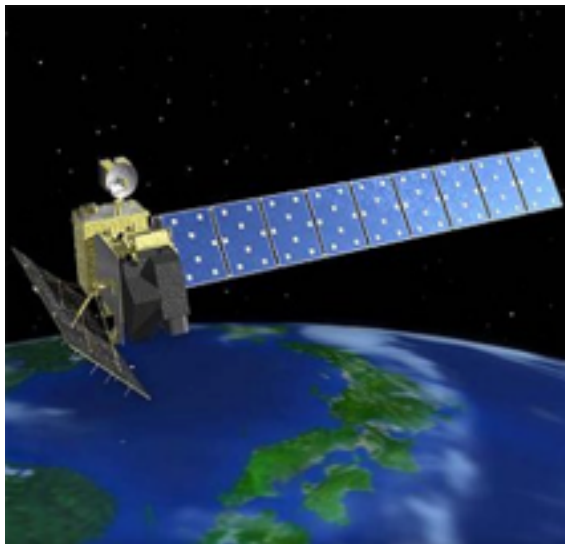
- \* Jambi in Indonesia was selected as research area.
- \* Indonesia is one of the largest peatland owners in the world.
- \* This area suffers serious floods during the rainy season due to the peatland subsidence.



Jambi, Indonesia

# ALOS PALSARによるInSAR解析

- \* ALOS PALSAR data was used for this research.
- \* With these 6 multi temporal images of research area, InSAR time-series analysis was conducted.

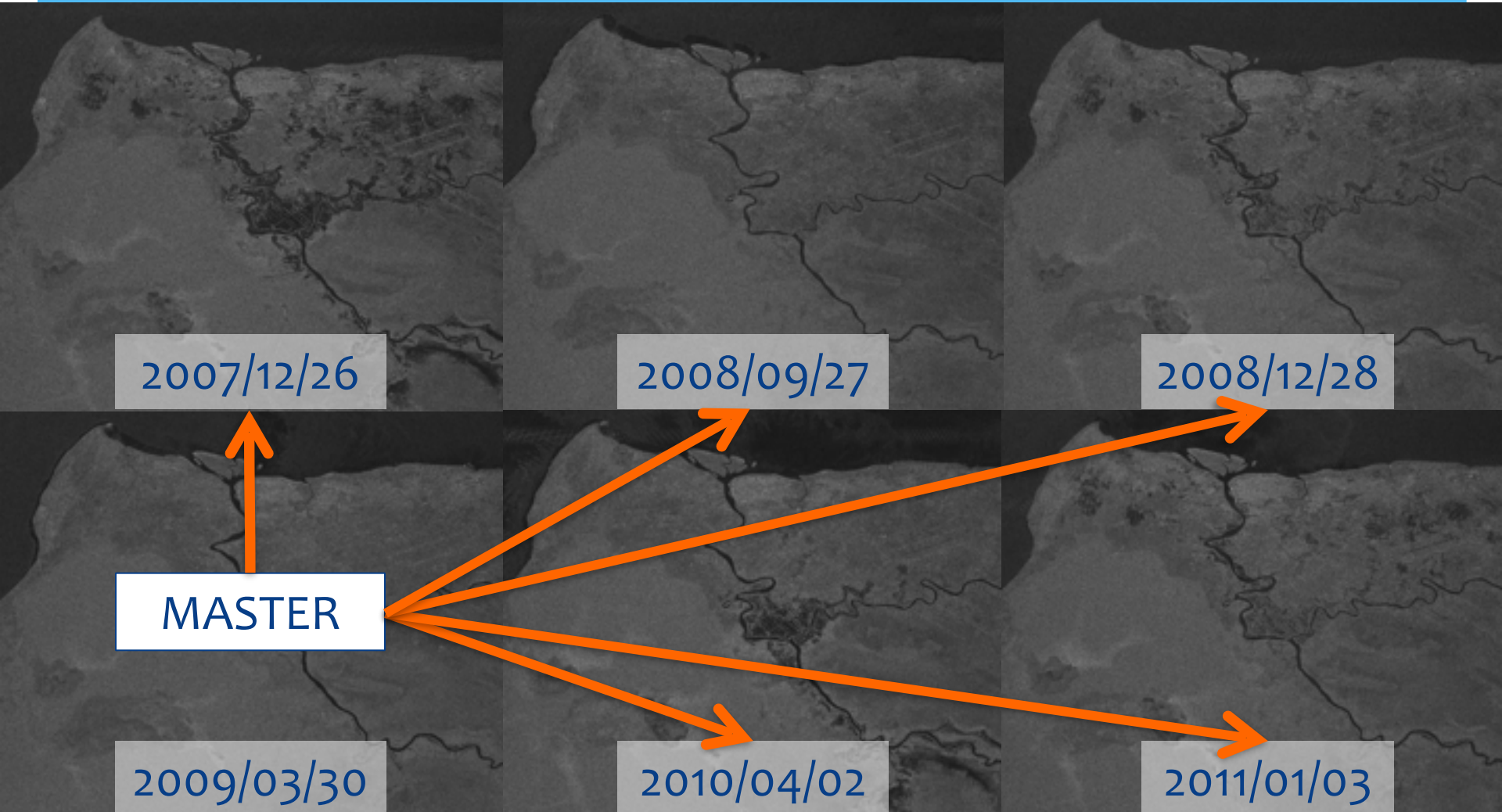


ALOS PALSAR

PALSAR data (Descending)		
Observation Date	Observation Mode	Bperp (m)
20071226	FBS	0
20080927	FBS	324.78
20081228	FBS	94.97
20090330	FBS	385.07
20100402	FBS	184.95
20110103	FBS	380.51

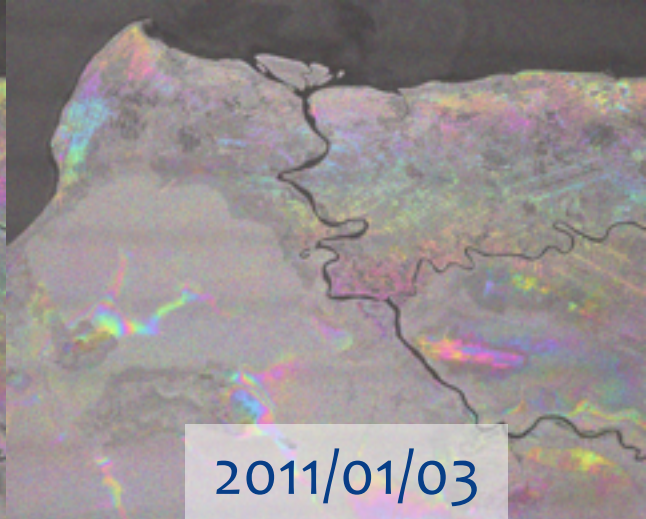
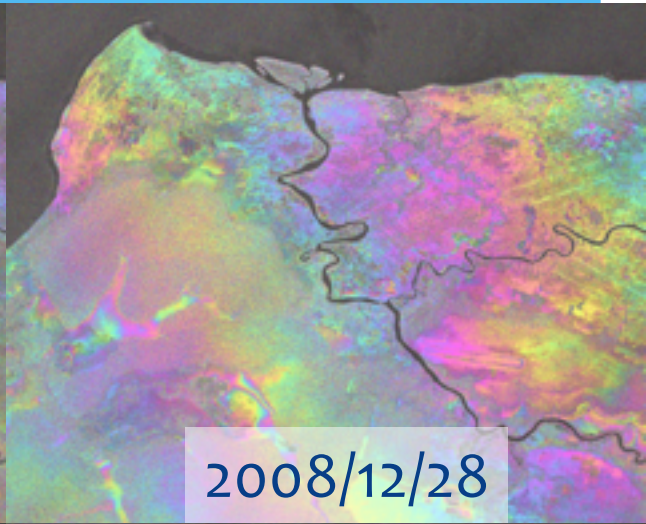
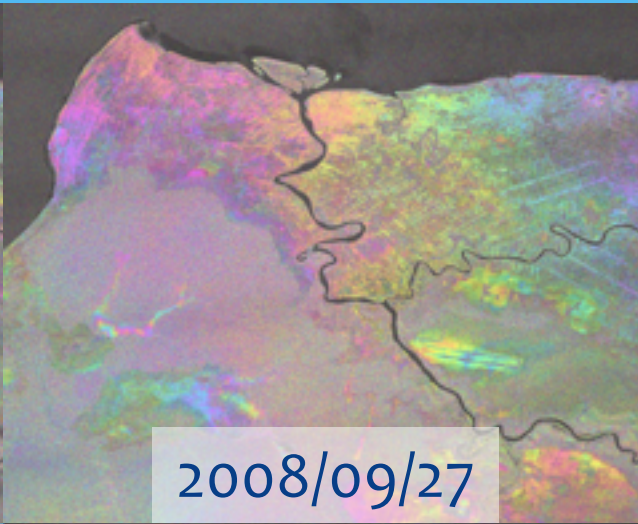
Master →

# SLC Images

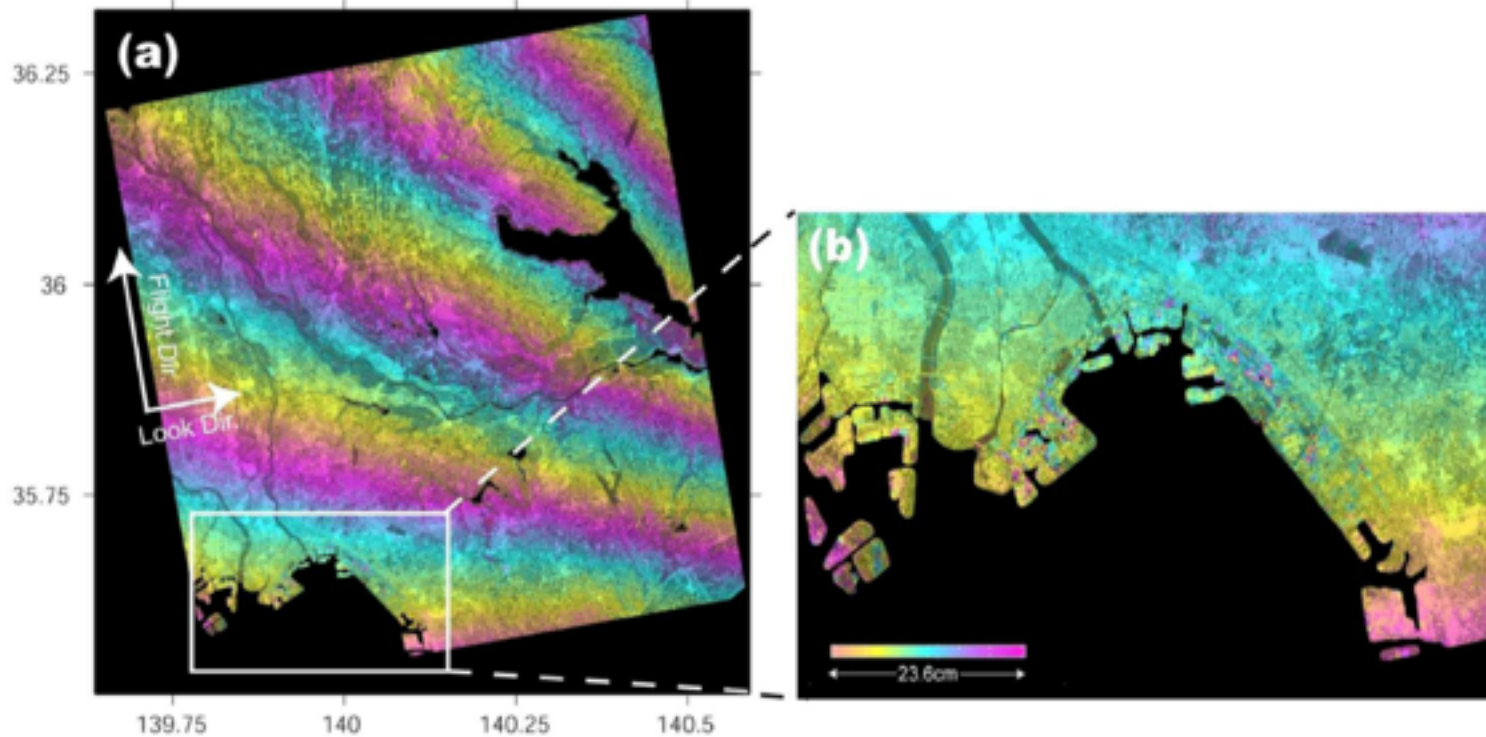


[Tsunoda, 2014]

# Result of Interferometric Processing

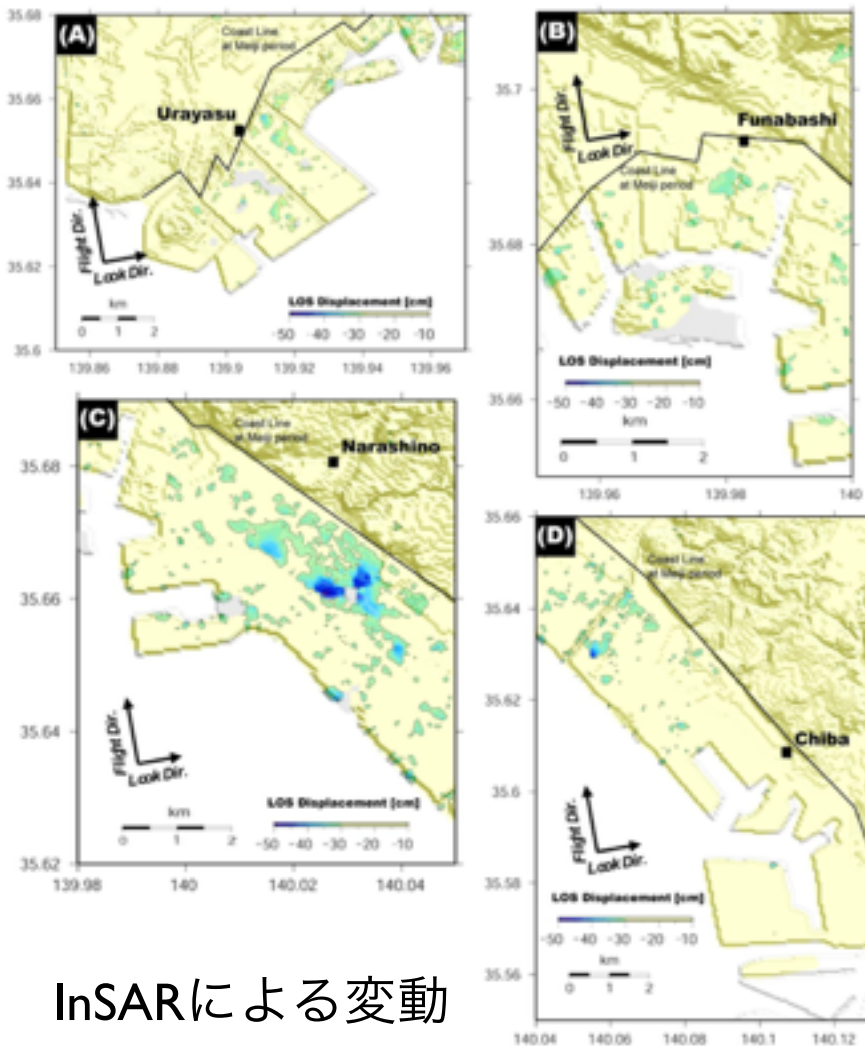


# 東京湾岸のInSAR解析事例

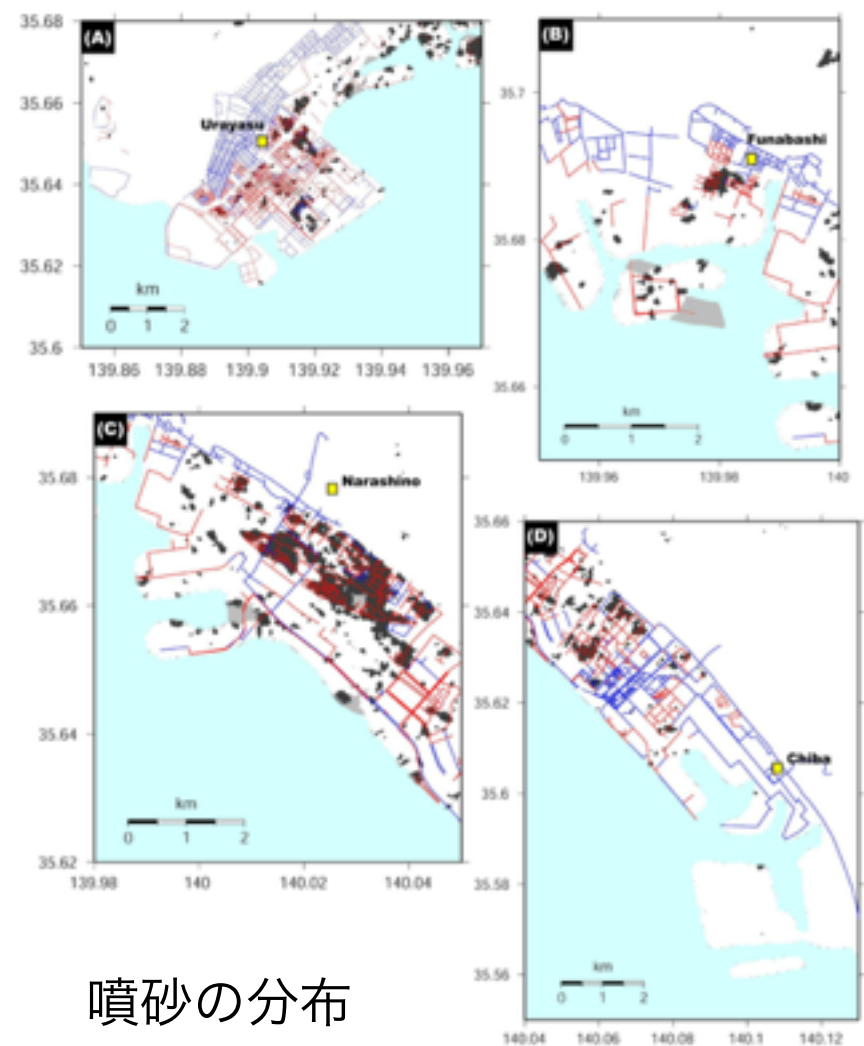


差分干渉画像（地表変動に伴う衛星視線方向の位相変化）. (a) 解析シーン全体, (b) 東京湾臨海域の拡大図. 東京湾臨海域では広域的な位相の変化の傾向とは異なった傾向の位相の変化を確認できる.

# 東京湾岸のInSAR解析事例



InSARによる変動



噴砂の分布

東京湾臨海域 (図-4 (A) ~ (D)) の衛星から遠ざかる向きに局所的な変動。(A) ~ (D) では平均的な地盤の量よりも約 3cm 以上衛星から遠ざかる向きの変動量を局所的な変動とした ((A):-28cm, (B)~(D):-30cm 以上変動を局所的な変動とみなした)。灰色の箇所は干渉度の低下により変動が得られなかった地域を示す。黒線は明治時代の海岸線<sup>10)</sup>を示し、本研究では明治時代の海岸線よりも海沿いを埋立地とみなした。

地震直後の噴砂調査の結果との比較。噴砂調査の結果は国土交通省関東地方整備局及び地盤工学会により報告された結果<sup>11)</sup>を用いた。赤線は噴砂が確認された箇所、青線は噴砂が確認されなかった箇所を示す。黒色、灰色はそれぞれ、本研究により推定された局所的な沈下域、干渉度の低下により地表変動の推定を行わなかった箇所を示す。

- 🍏 リモートセンシング技術の発展に伴い、衛星画像を解析することによって、短時間での地盤変動や、海外等の地上の水準点がない地域でも、地盤変動を高精度に、経済的に、広域に把握できる。
- 🍏 衛星観測では、広域に面的地表面変動が捉えられるため、地下構造物建設による地盤沈下の検知は比較的容易であるが、森林や河川敷など植生の深い所、反射波が弱いエリア、コンクリートの平面などは、電波の後方散乱が少なく、観測は困難である。
- 🍏 2000年半ばから解析が可能となっている偏波観測を用いれば、地上物体の形状を識別することが可能である。
- 🍏 PSInSARを用いれば、コヒーレンスの低い長基線データを無駄にせず利用することができ、大気の遅延ノイズを避けることも可能となる。