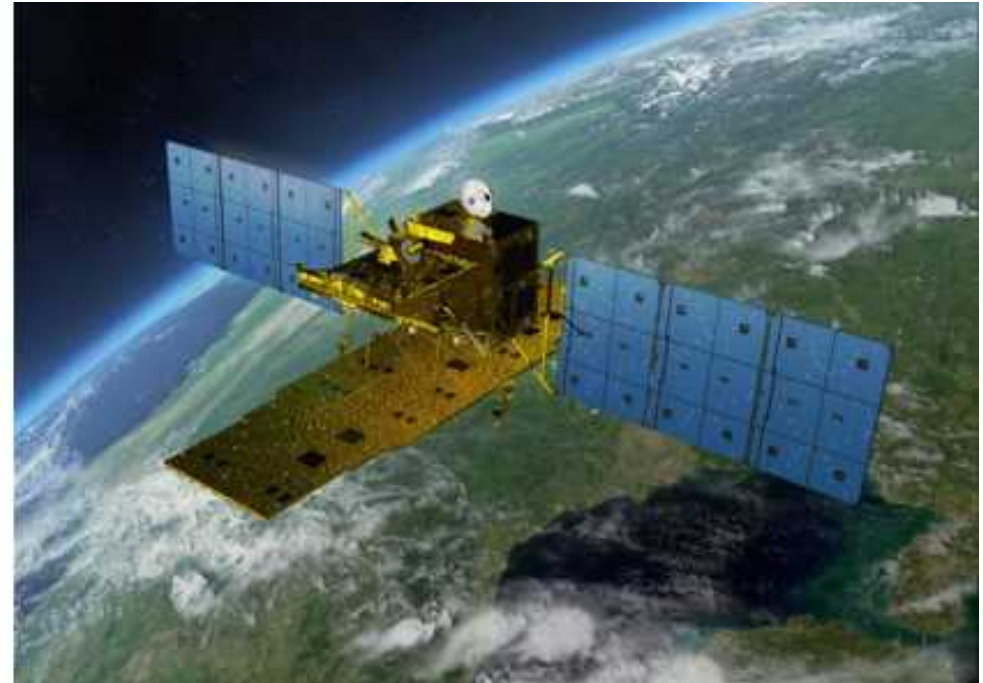


リモートセンシングによる地盤沈下観測技術について ～合成開口レーダー (SAR) による地盤変動観測～



合成開口レーダー (SAR) を搭載した ALOS(だいち 1 号) と ALOS-2(だいち 2 号) (C)JAXA

近藤昭彦 (千葉大学環境リモートセンシング研究センター)

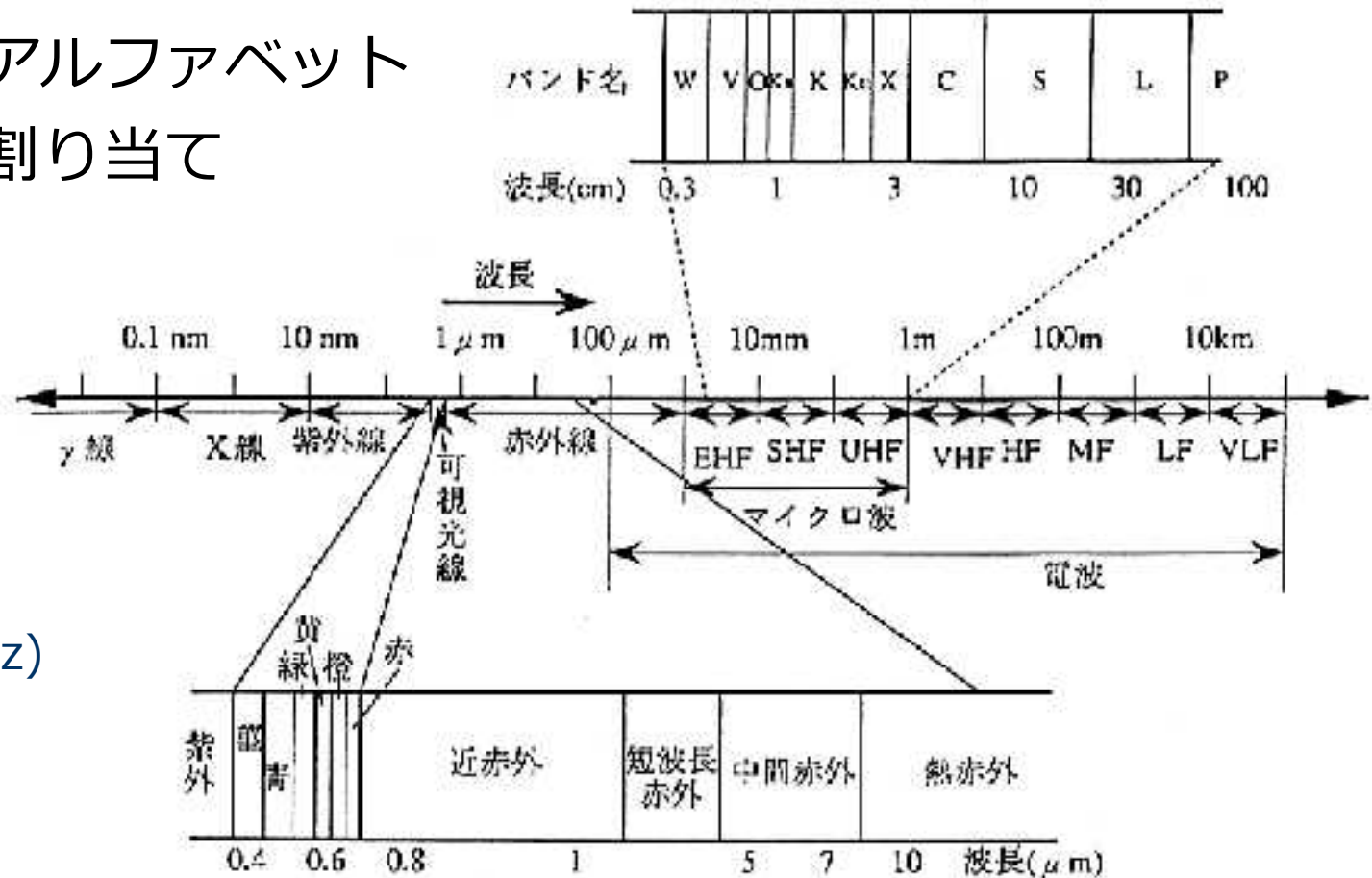
マイクロ波とは ～マイクロ波リモートセンシング～

- ・ 厳密な定義はないが、波長で cm オーダー、周波数で GHz 帯 (1 ～ 300GHz) の伝播の総称

- ・ 周波数により、アルファベットによるバンド名割り当て

- ・ C バンド
6GHz 帯 (4 ～ 8GHz)
波長 3.7 ～ 7.5cm

- ・ L バンド
1GHz 帯 (0.5 – 1.5GHz)
波長 20 - 60cm



二つのマイクロ波センサー

(1) 受動マイクロ波センサー

マイクロ波放射計で、大気や地表からの微弱な放射量を計測する

⇒ AMSR/AMSR-E



ADEOS II (C)JAXA

(2) 能動マイクロ波センサー

マイクロ波帯の電波を発射し、観測対象物から散乱によって戻ってくる電波を受信するレーダー型のセンサー

(a) マイクロ波散乱計

(b) マイクロ波高度計

(c) 映像レーダー

⇒ 合成開口レーダー

(synthetic aperture radar)



JERS1 (C)JAXA

衛星搭載 SAR によるリモートセンシングの歴史

最初の SAR 搭載衛星 SEASAT

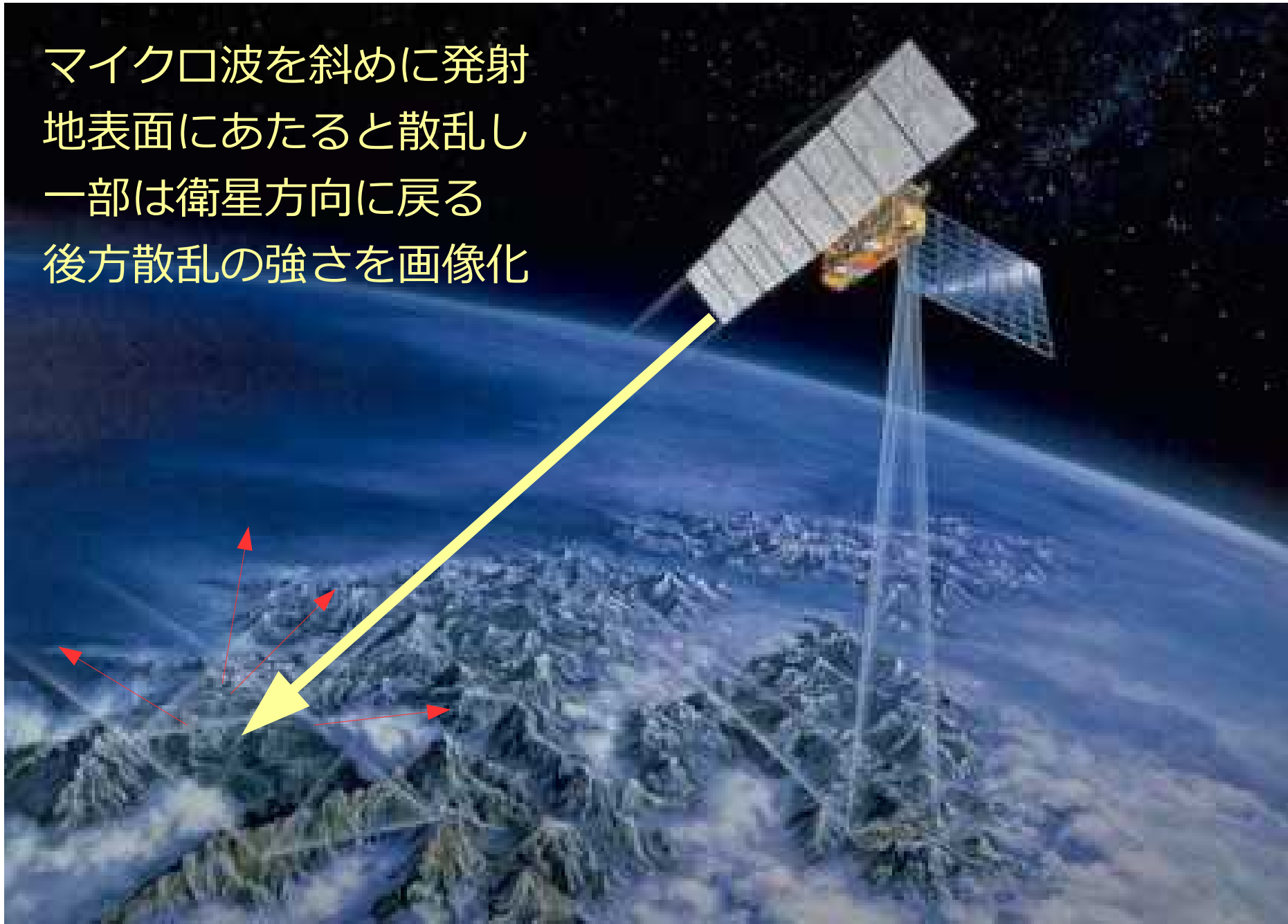
- ・ 1978 年 6 月 28 日 NASA に
より打ち上げられたが 105 日
で運用停止



ESA の ERS1(1991 年) 、そして日本の JERS1(1992 年) が
SAR による地球観測時代を開いた。

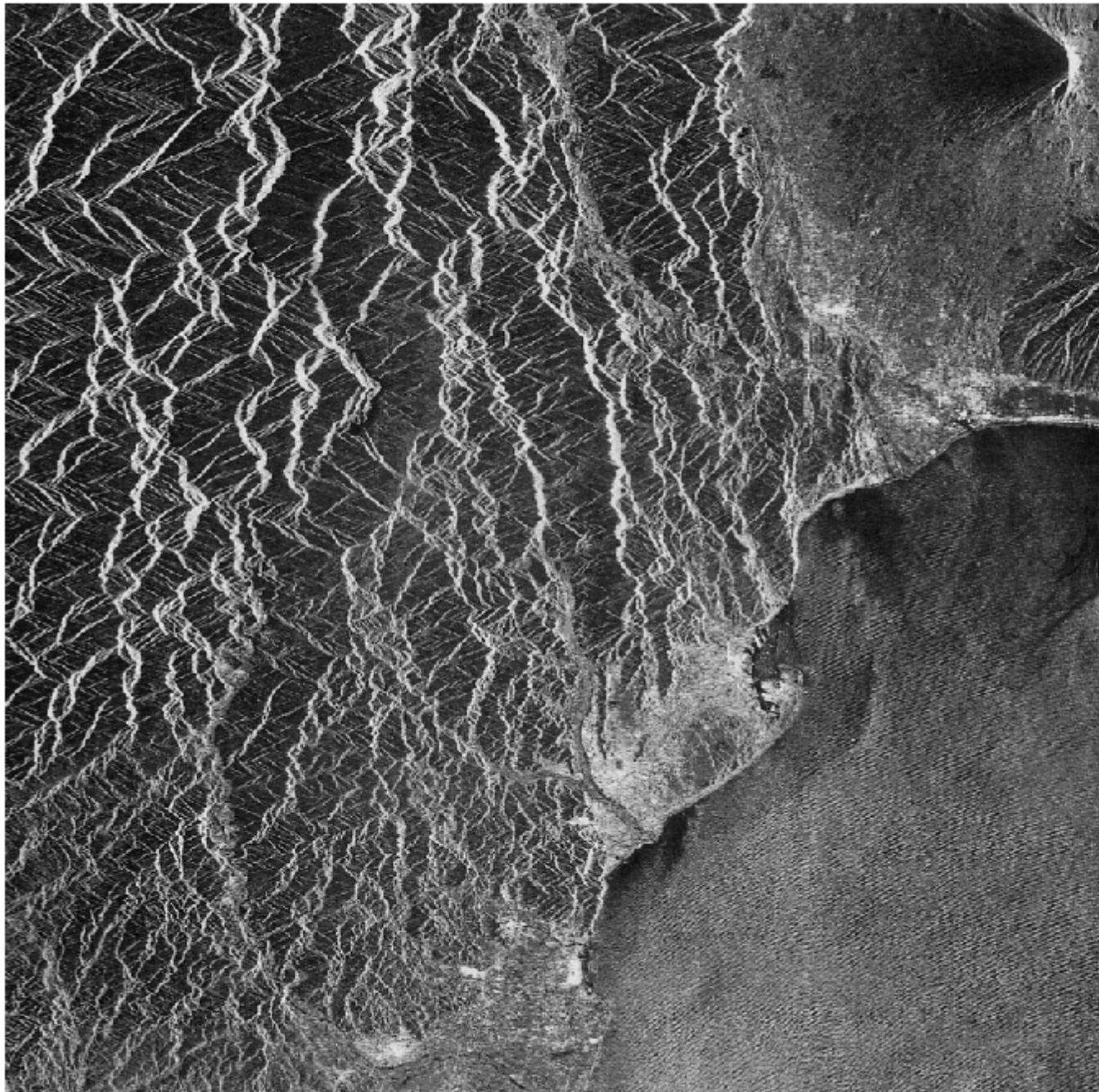


マイクロ波を斜めに発射
地表面にあたると散乱し
一部は衛星方向に戻る
後方散乱の強さを画像化



JERS1とERS1の合成開口レーダーのパラメーター

項 目	(J) E R S - 1 S A R	E R S - 1 A M I (映像モード)
周波数	1 . 2 7 G H z (L - band)	5 . 3 G H z (C - band)
波 長	2 3 . 6 c m	5 . 7 c m
偏 波	H H	V V
オフナディア角	3 5 °	2 3 °
走査幅	7 5 K m	8 0 k m
地上分解能	1 8 m	3 0 m
高 度	5 6 8 . 0 2 3 k m	
軌道長半径		7 1 5 3 . 1 k m
回 帰 日 数	4 4 日	3 日 氷観測用 3 5 日 通常観測用 1 7 6 日 海洋観測用
降交点通過地方時	1 0 : 3 0 ~ 1 1 : 0 0	1 0 : 3 0



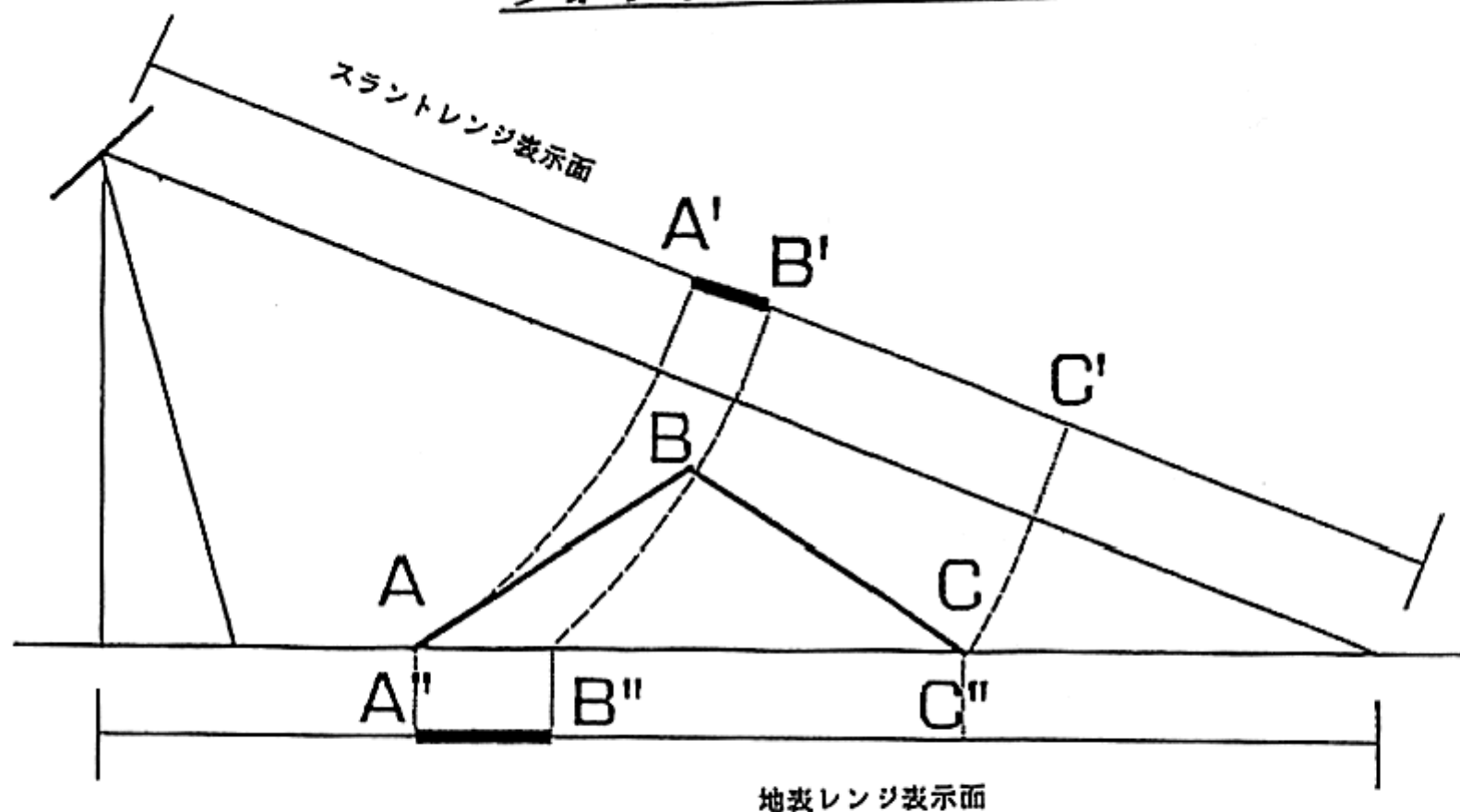
ERS1による静岡付近 の画像

画像の濃淡は地表か
らの散乱の強さを表す

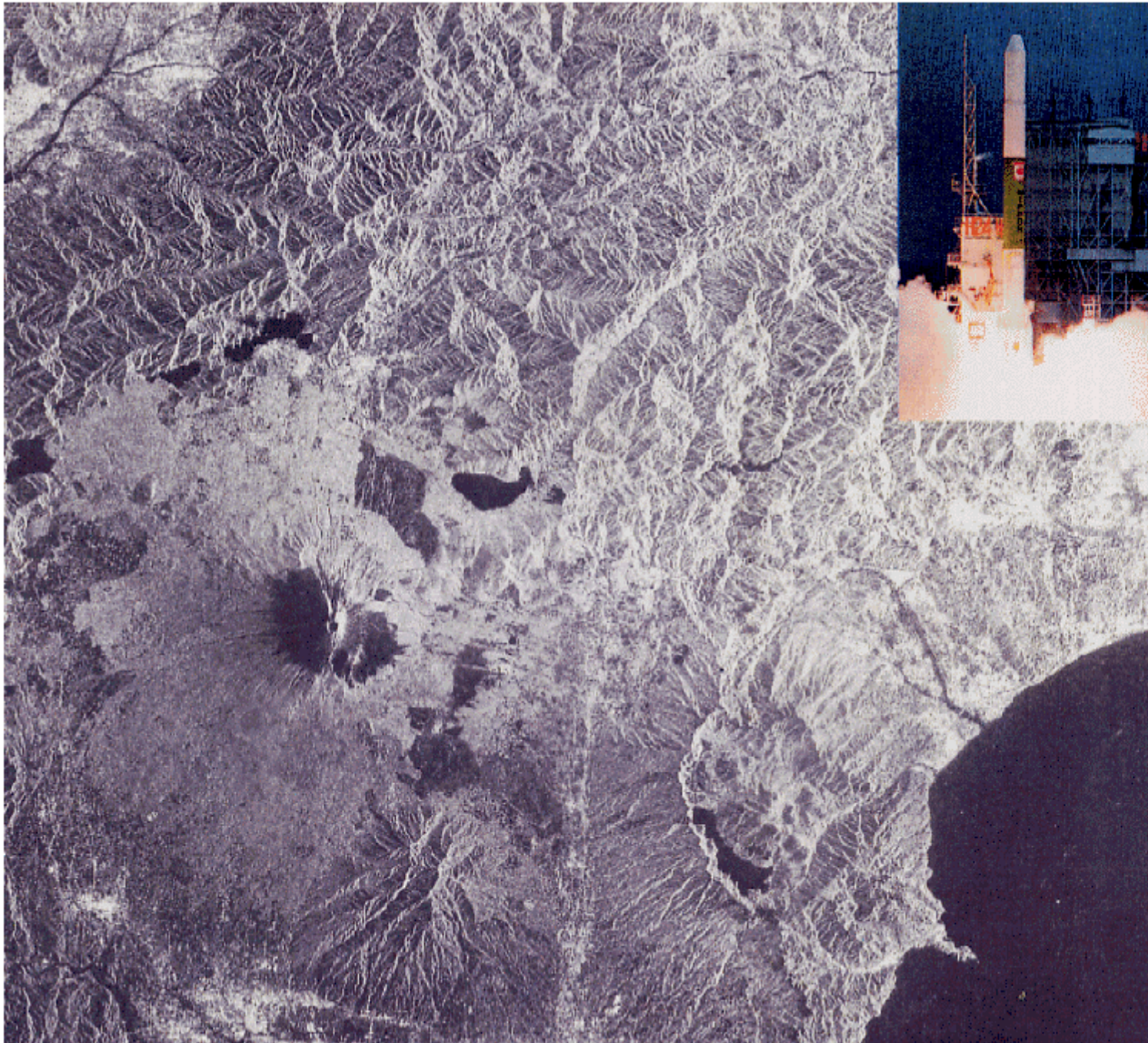
- ・富士山の形は？
- ・赤石山脈の形は？
- ・海に見えるものは？



フォアショートニング



レーダー画像では画像上の位置は衛星からの距離に比例する。上図のように二等辺三角形の山は画像上では衛星側の斜面が短く映し出される。これをフォアショートニングという。

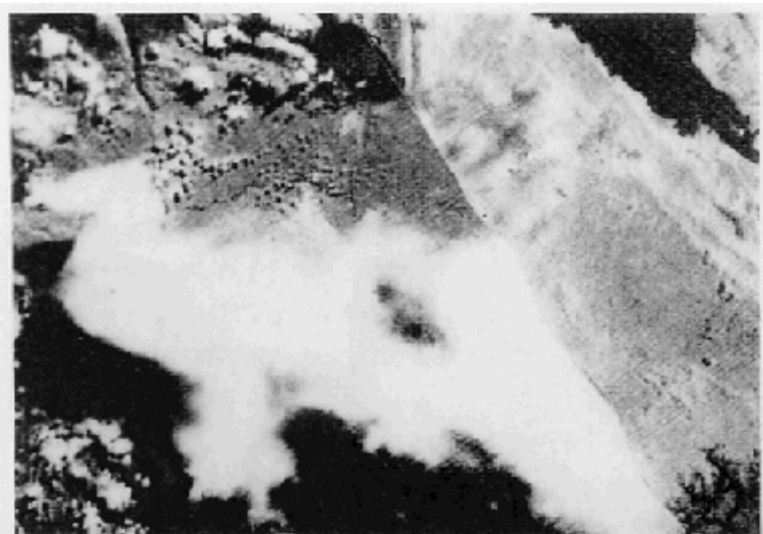


JSARによる富士山周辺地域

- ・色合いの違いは？
- ・地形はよく見える？
- ・海の情報とは？



マイクロ波リモートセンシングの特徴



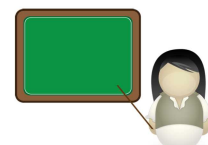
- ・波長1cm～数十cmのマイクロ波帯電波を用いるリモートセンシングは雲の有無に影響されず、また昼夜の別なく観測できる

- ・特に波長数cm以上のマイクロ波帯は雨に影響されることなく、天候に無関係に観測できる

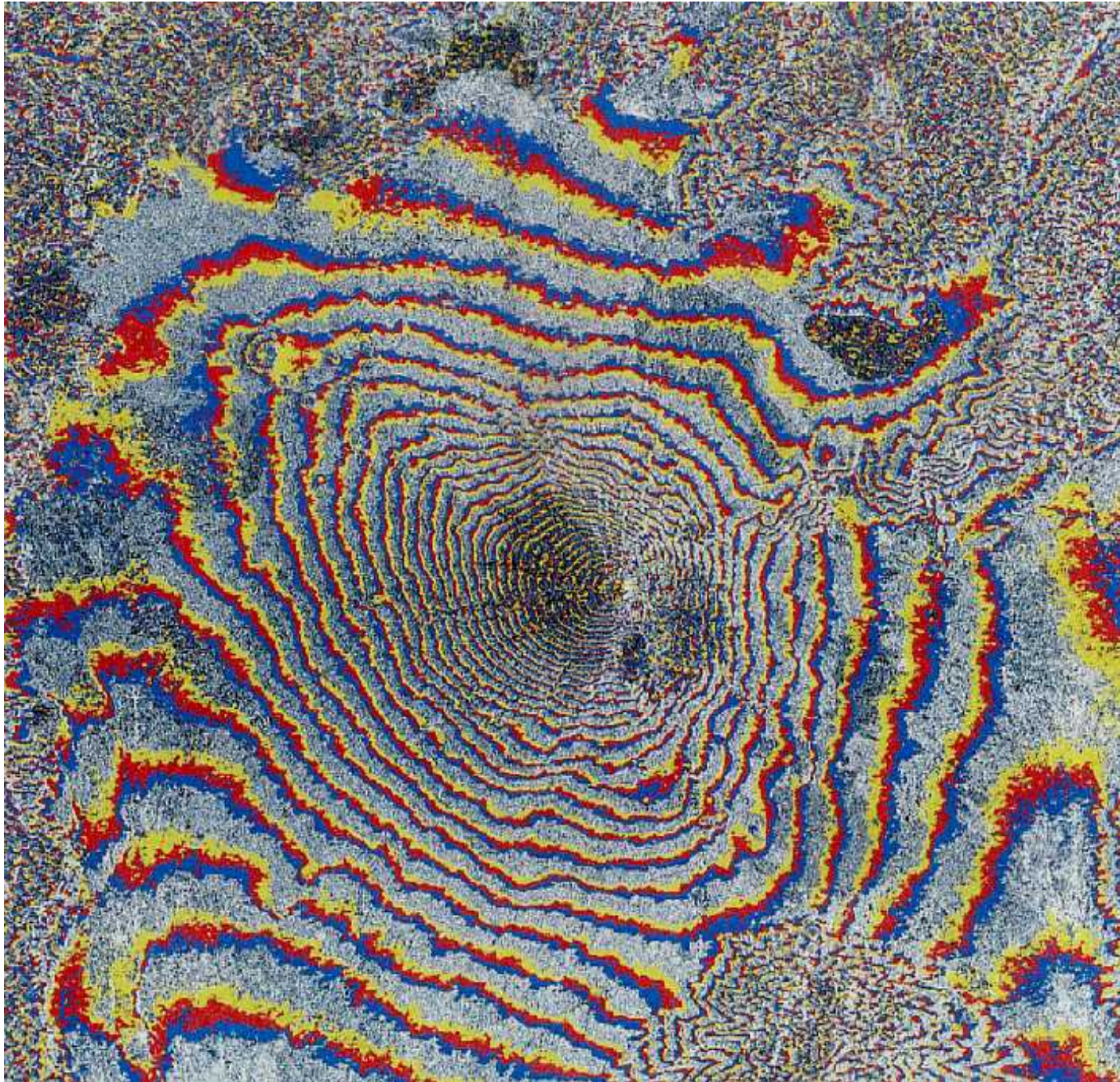
いつも雲に被われている湿潤熱帯地域でも雲を通して地表面を観測できる(左の画像はインドネシア、イリアンジャヤ)



広域の地形構造が見えることにより、石油等の資源探査が容易になった

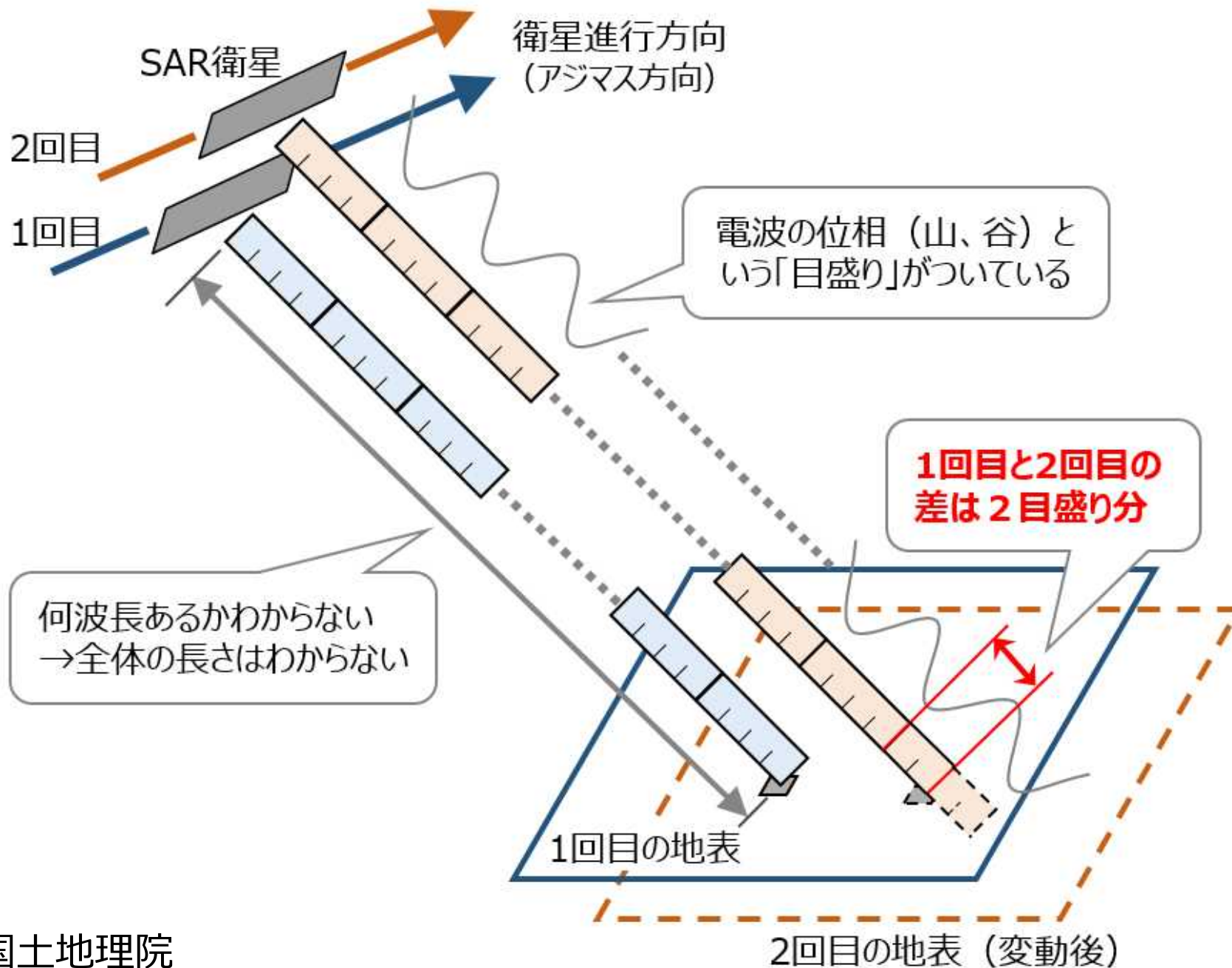


干渉 SAR (InSAR) ～高さとその変化情報～

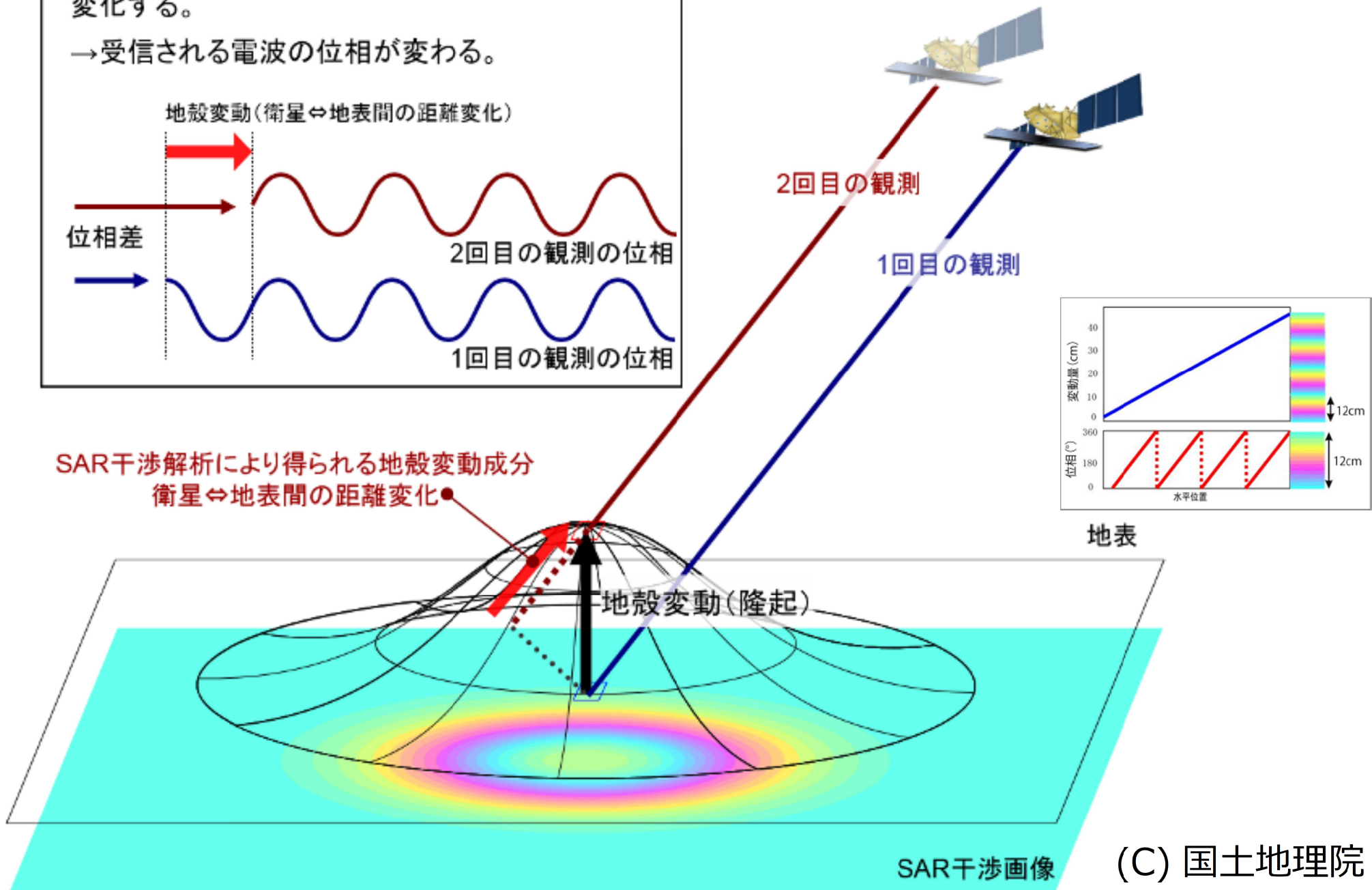
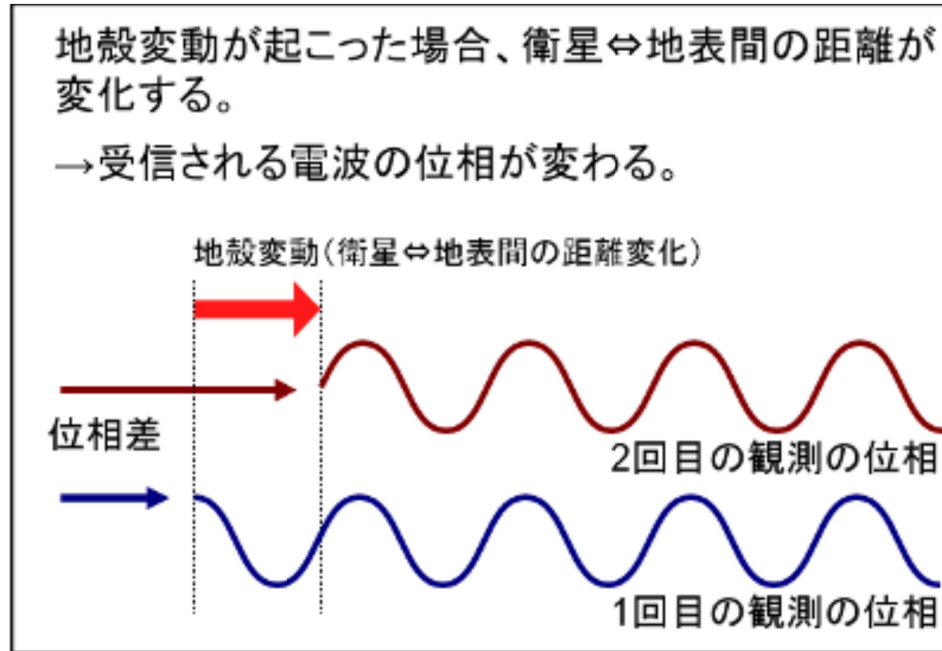


(C)RESTEC

干渉 SAR による地盤変動の抽出 ～マイクロ波は波～



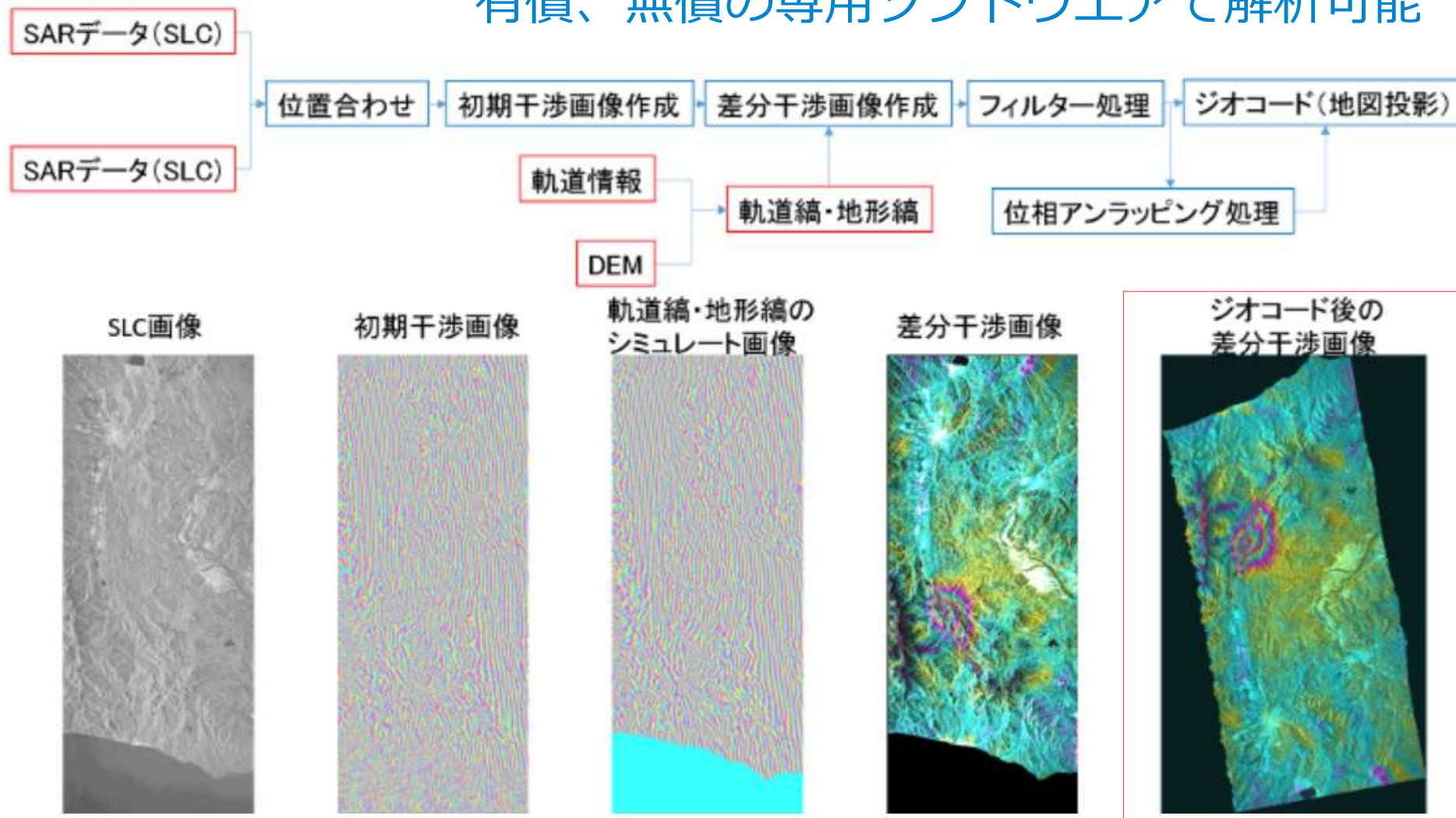
1 周波数の変化は 12cm(波長の 1/2)、周辺の不動域からつなげる (Lバンドの場合)



一般的な干渉 SAR の解析手順

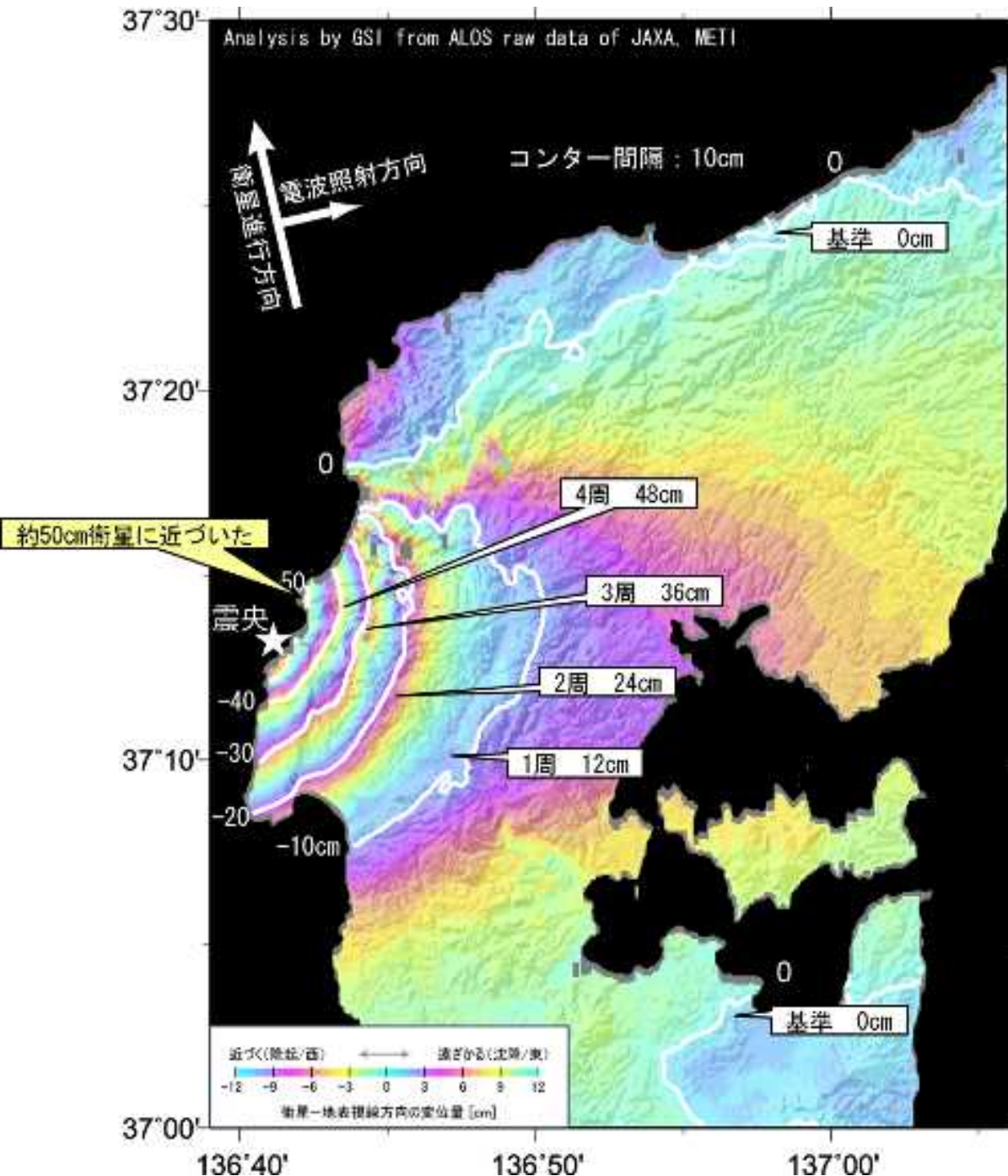


有償、無償の専用ソフトウェアで解析可能



必要なデータ： SAR 画像、 DEM （数値地形モデル）

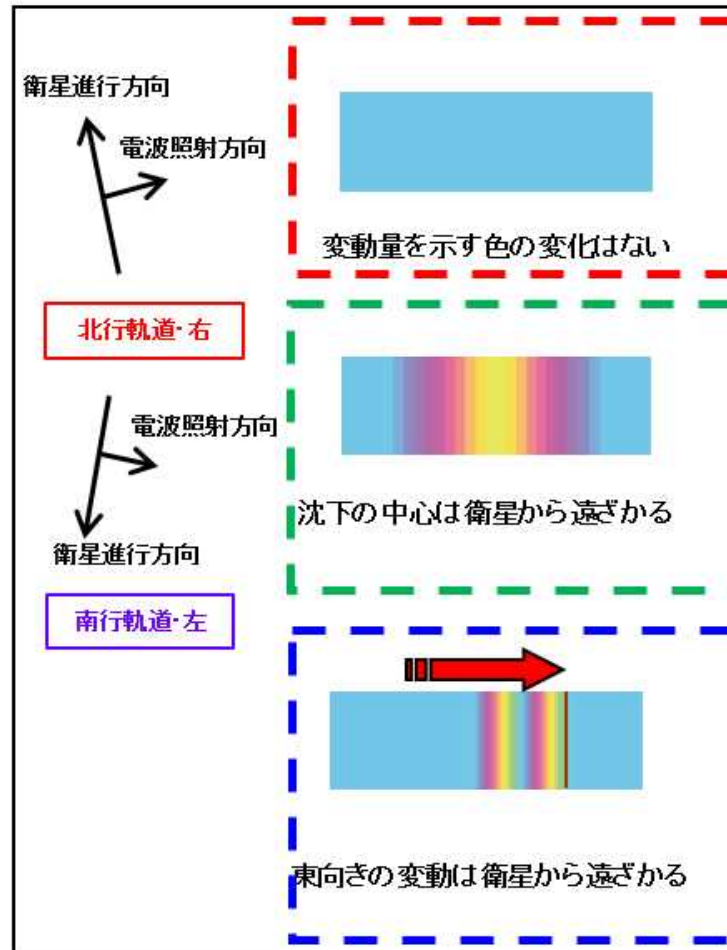
2007 年能登半島沖地震



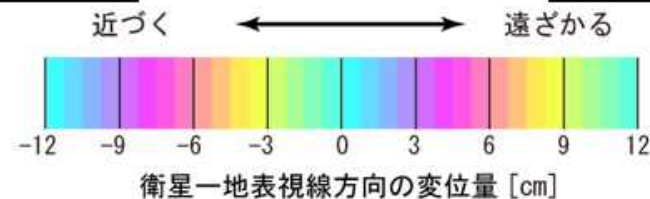
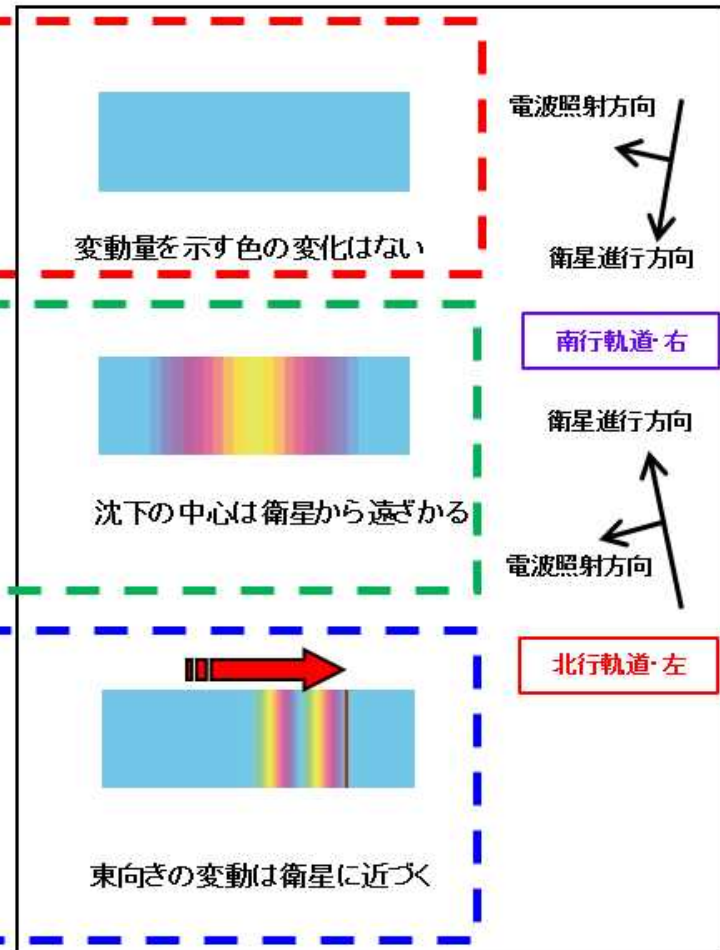
- 青から赤までの色の变化
一周分は約 12cm の
変動量に相当
- 震央から遠い青の基準
(0cm) として変動量
を計算
- 青から赤の 4 周の色の
変化は約 50cm の地殻
変動量となる

干渉 SAR 画像の見方

西側から観測した時の見え方

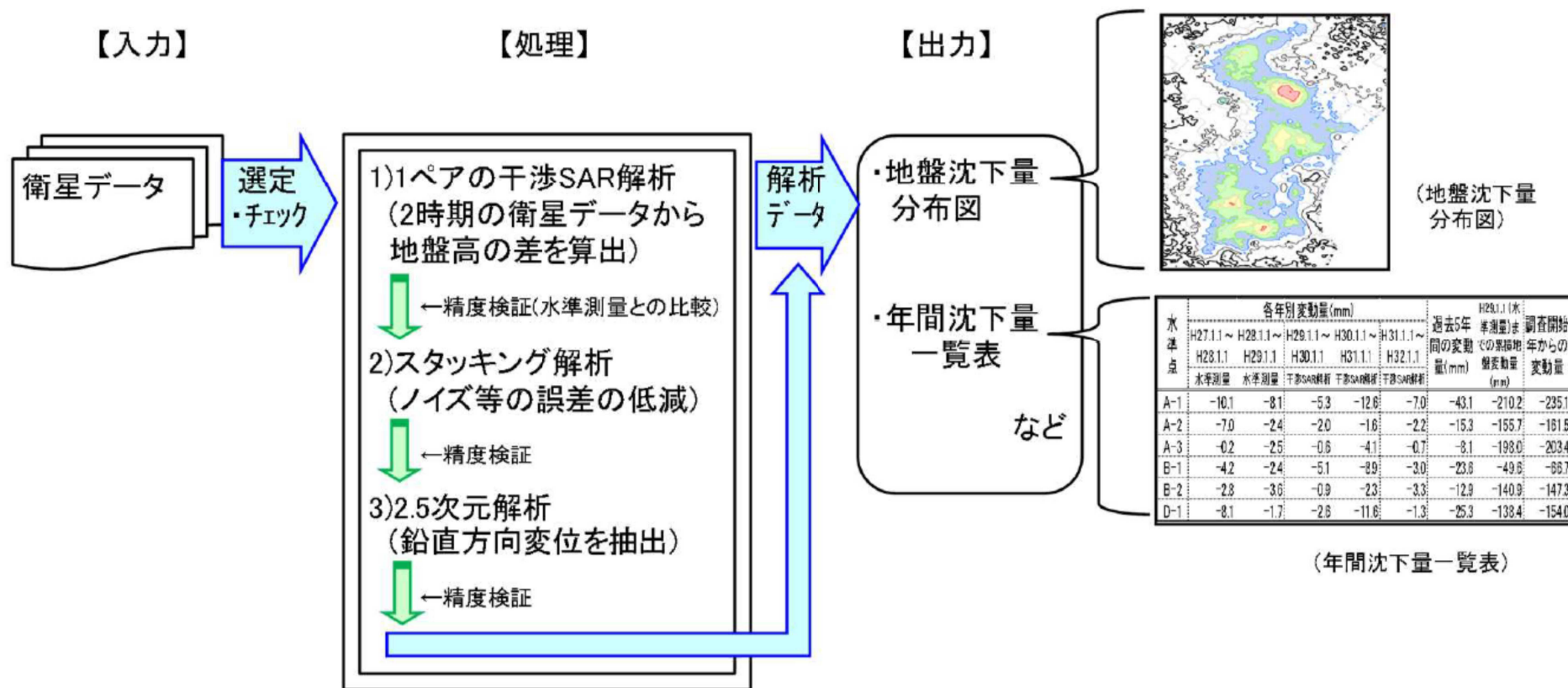


東側から観測した時の見え方



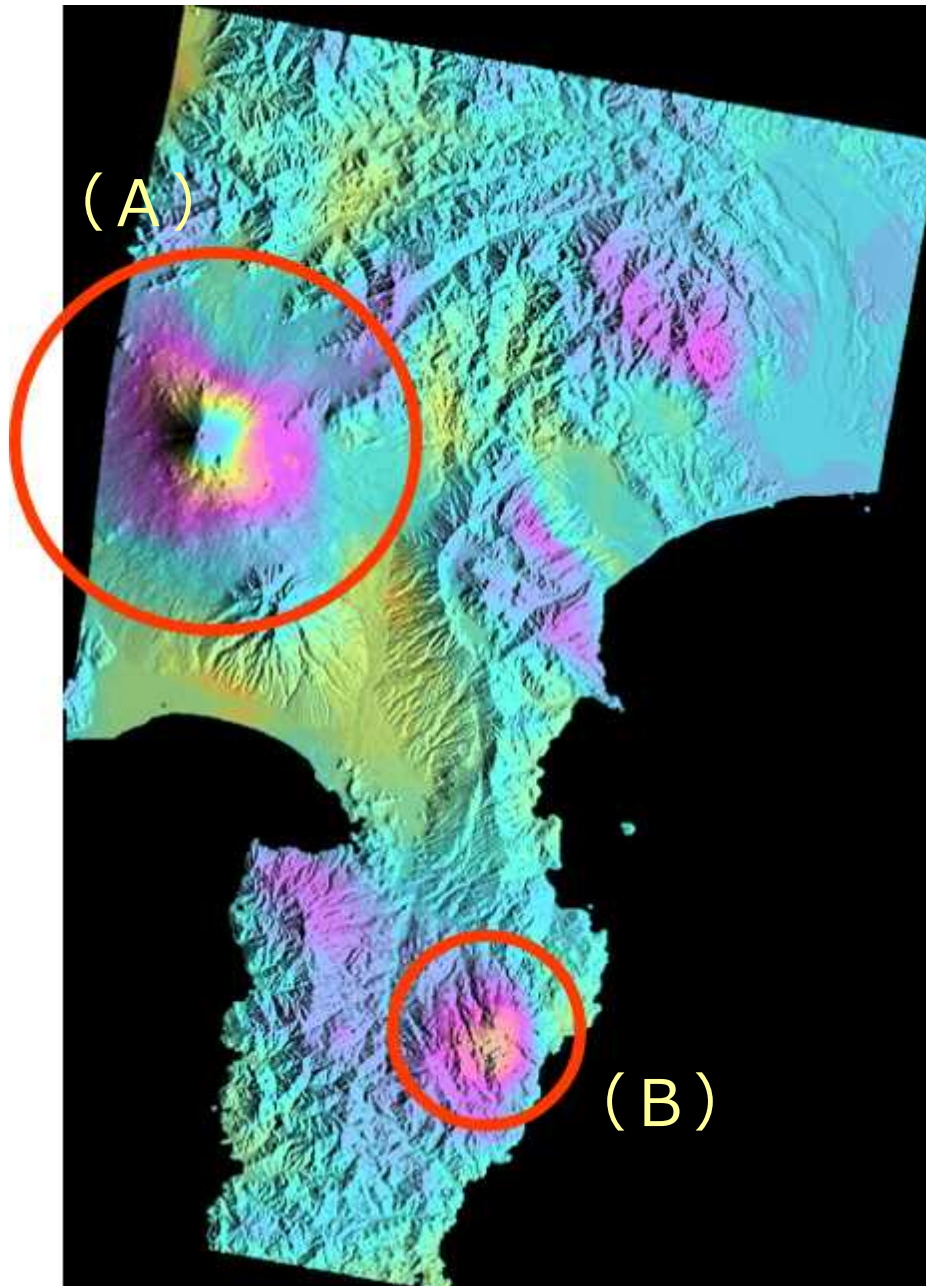
干渉 SAR による地盤沈下の標準解析手順

(環境省 地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル H30)

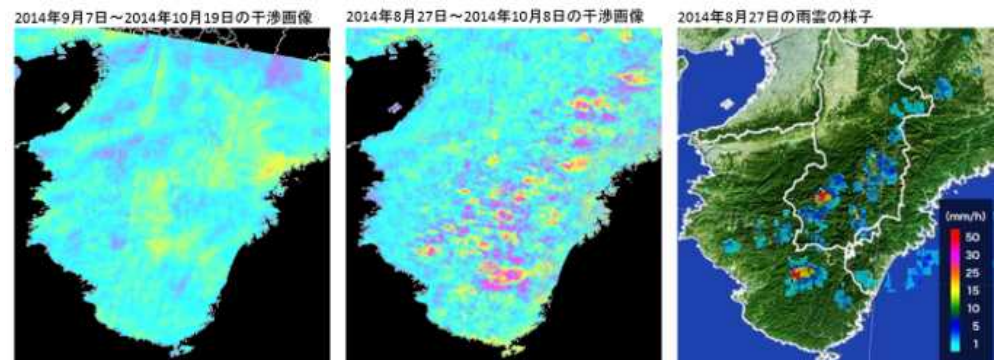


- ① 1 ペア (2 時期画像) の干渉 SAR 解析⇒地盤高の差を求める
- ② スタッキング解析⇒大気遅延等による誤差を平均化し低減
- ③ 2.5 次元解析⇒変位成分を分離し、鉛直沈下量を算出

SAR 干渉画像に含まれる誤差 ～水蒸気による誤差～

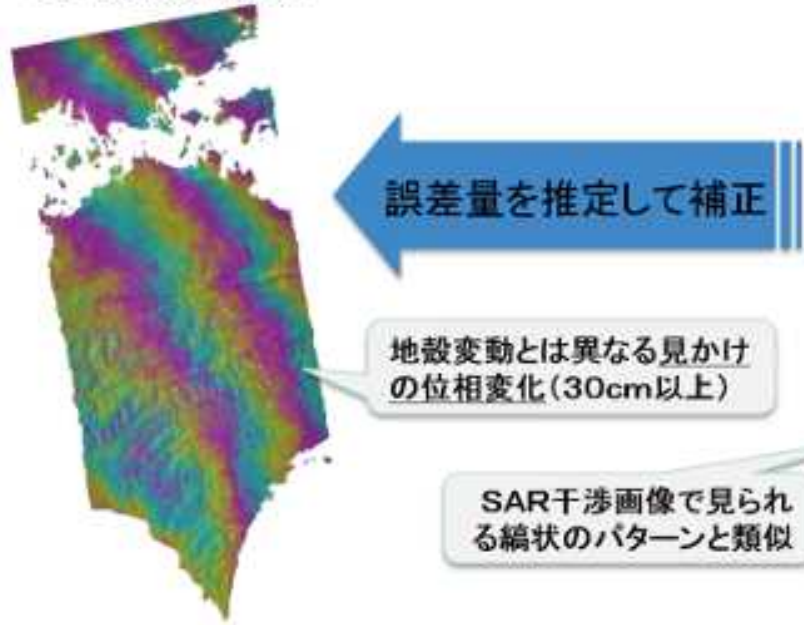


- ・鉛直方向の水蒸気分布 (A)
標高により大気の厚さが異なるため
- ・水平方向の水蒸気分布 (B)
大気中の水蒸気の空間的なむらによるもの
⇒雨雲の分布と似ている
ランダムに現れる

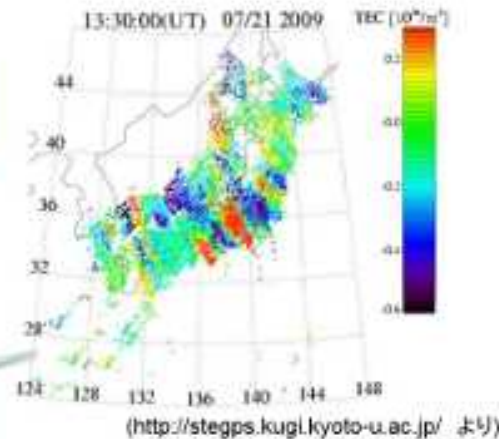


(C) 国土地理院

四国東部の観測例



GEONETで観測されたTEC擾乱



※TEC(Total Electron Content):全電子数

電離層の影響

時に数十 cm 程度の誤差

DEM による誤差

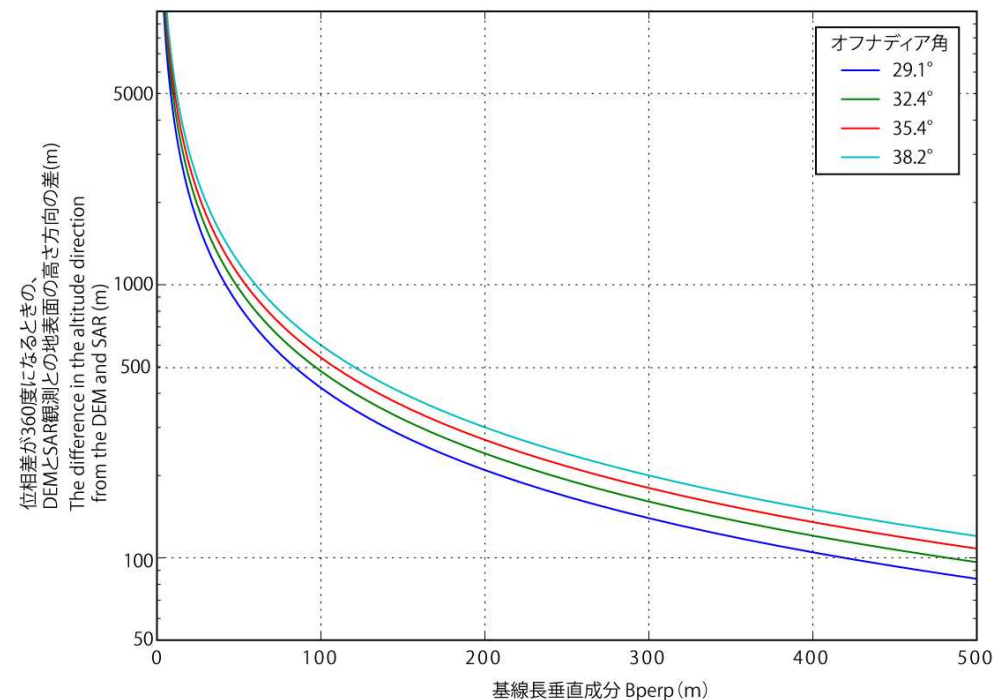
時に数十 cm 程度の誤差

最新の DEM の利用

様々な誤差修正法が提案

複数の期間の観測を比較

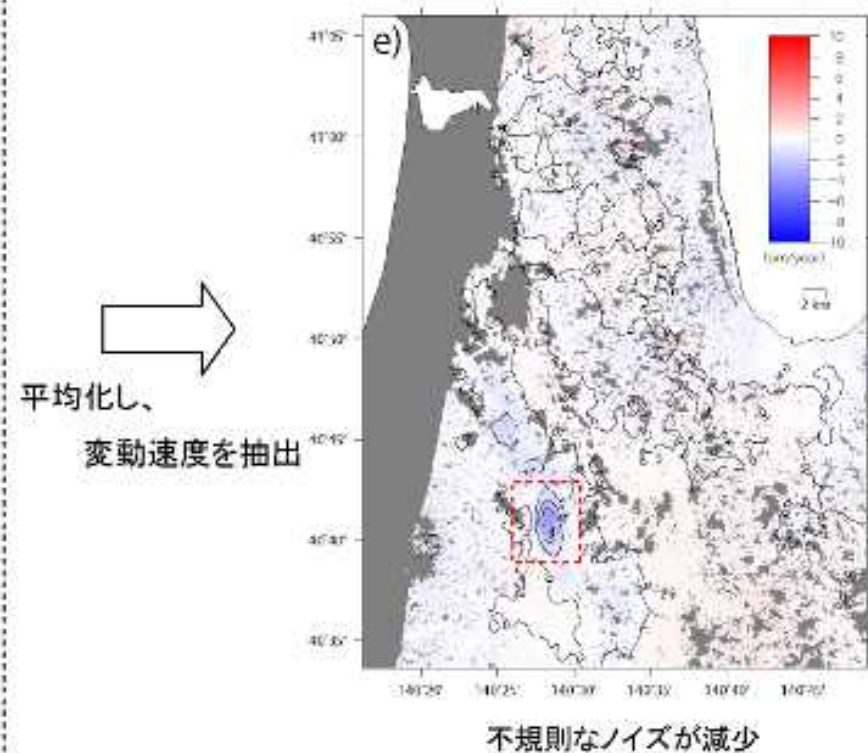
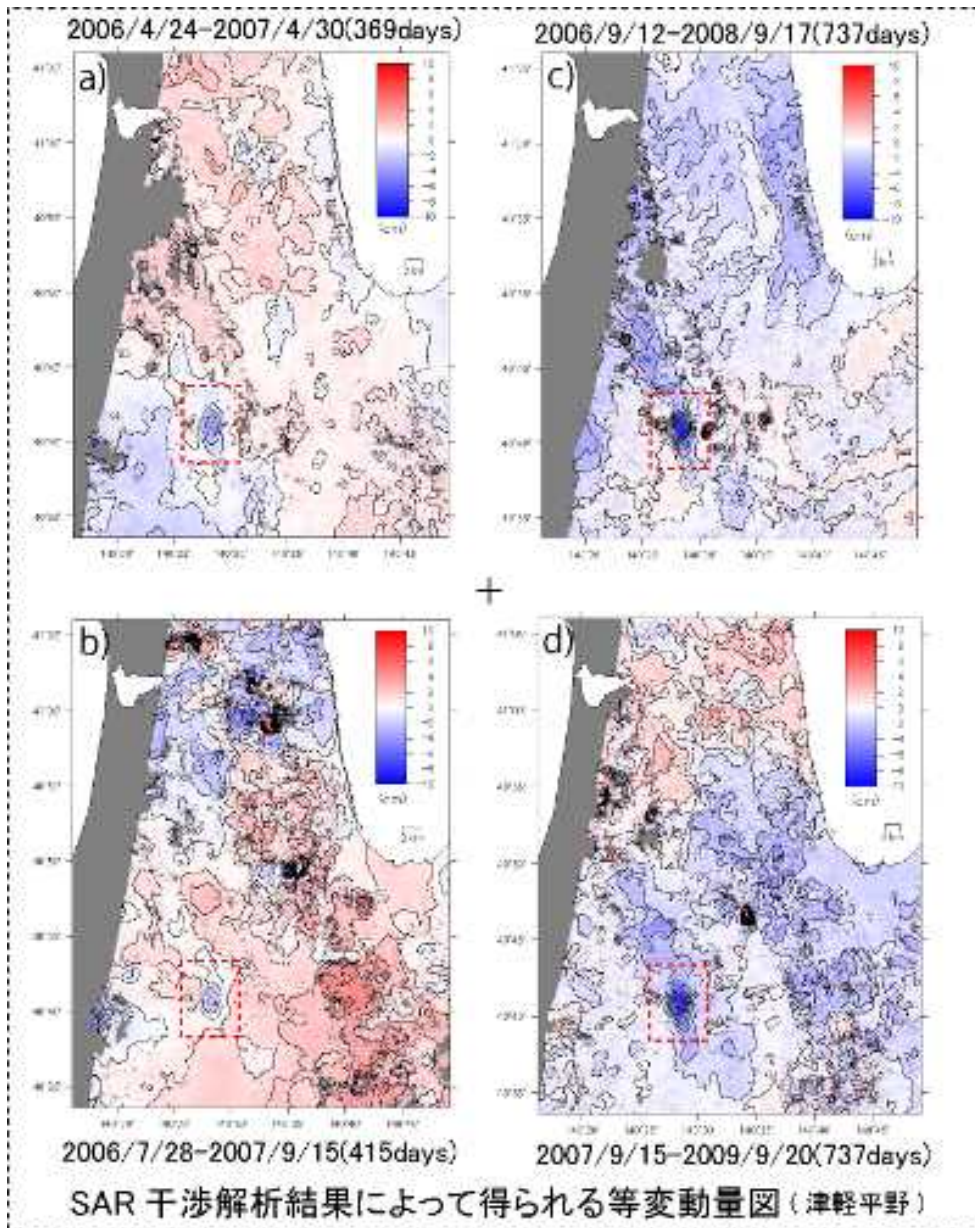
⇒ スタッキング



スタッキング

複数の解析結果を平均化

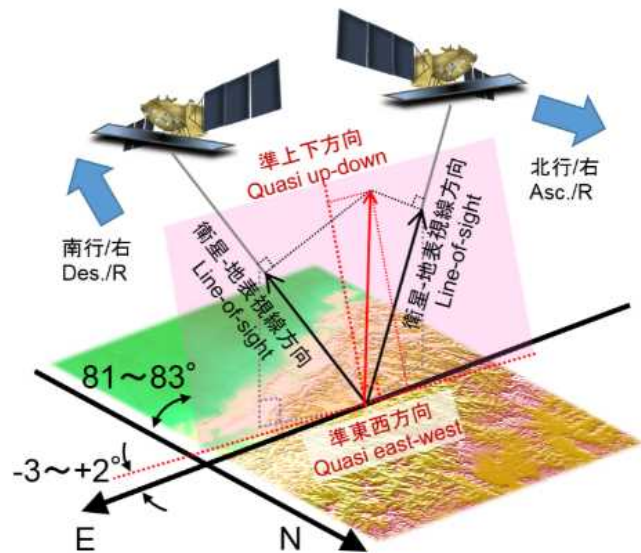
- ① 2006/4/24-2007/4/30(369days)
- ② 2006/9.12-2008/9/17
- ③ 2006/7.26-2007/9/15
- ④ 2007/9/15-2009/9/20



平均化でランダムなノイズが除去

- ・ 指針では mm/y が標準
- ・ 変動速度は一定と仮定

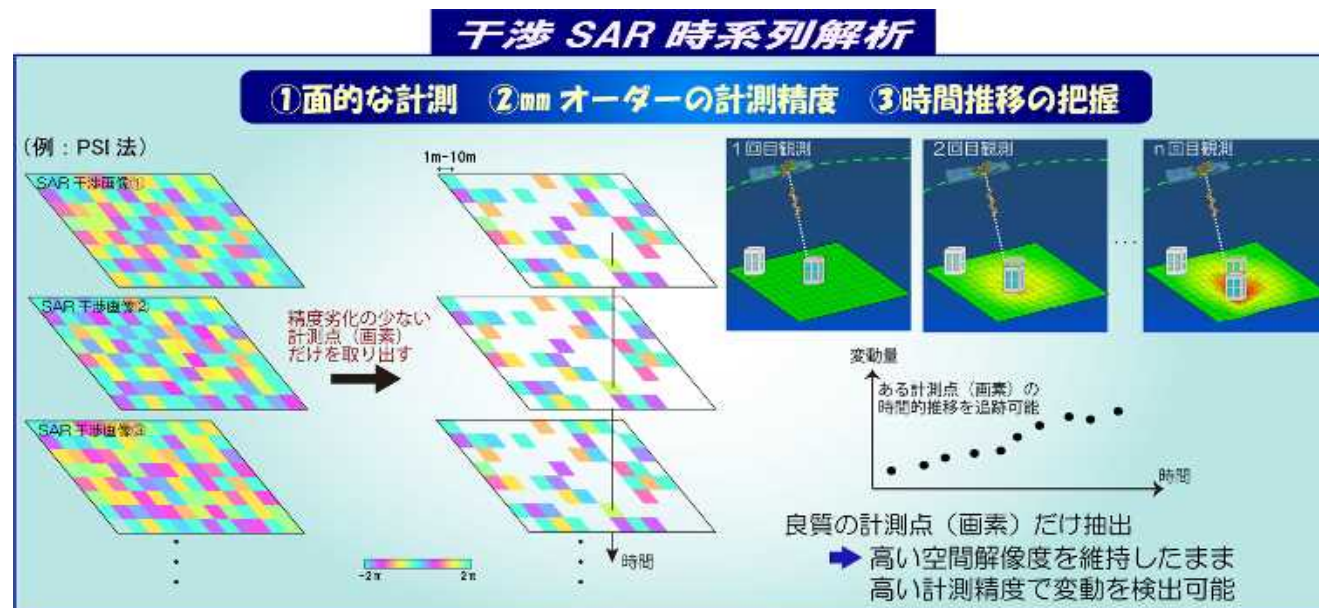
2.5 次元解析



- ・ 昼と夜の軌道の画像を使うと、西側と東側の両方から観測を行うことができる
- ・ 2 方向からの観測結果を合成し、変動量を東西方向と上下方向に分離できる
- ・ 単純な方法では視線方向の変化をオフナディア角で鉛直方向の変化に変換

干渉 SAR 時系列解析

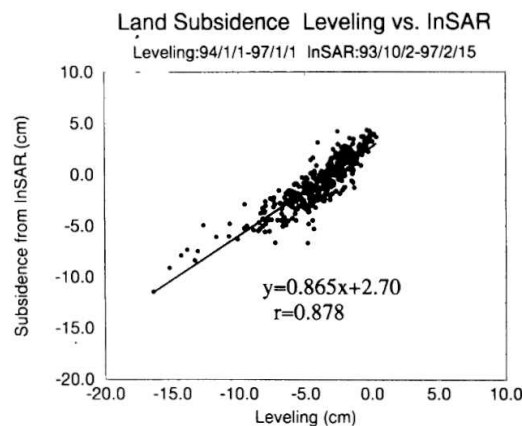
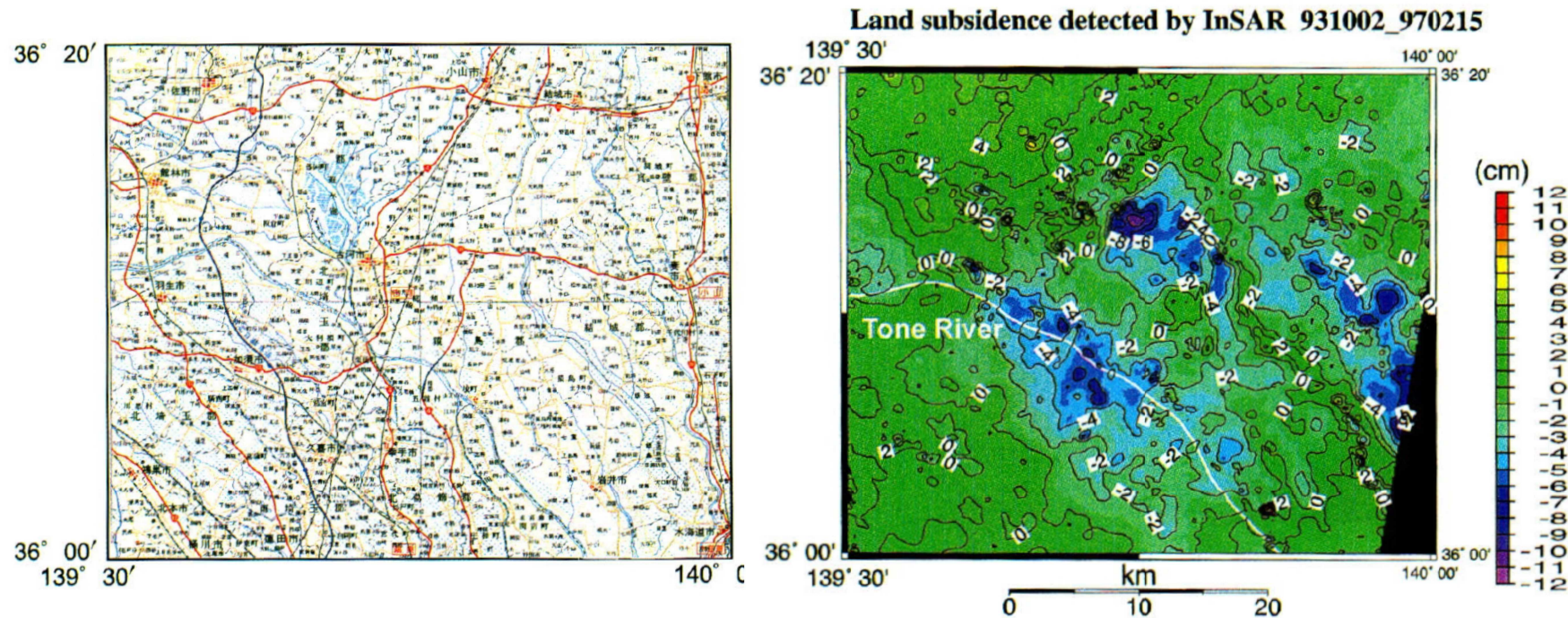
(C) 国土地理院



精度の良い画素を抽出し、地盤高の時系列を求めることができる

J-SAR による干渉 SAR の地盤沈下に関する初期の成果

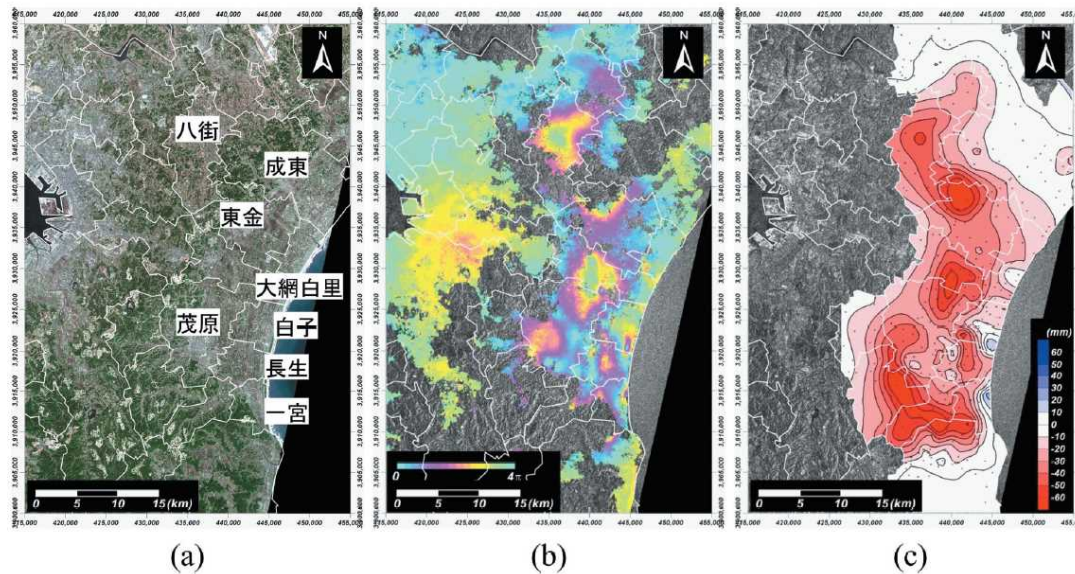
中川ほか (1999) : JERS-1 による干渉 SAR で検出した関東平野北部の地域の地盤沈下、測地学会誌、45、347-350.



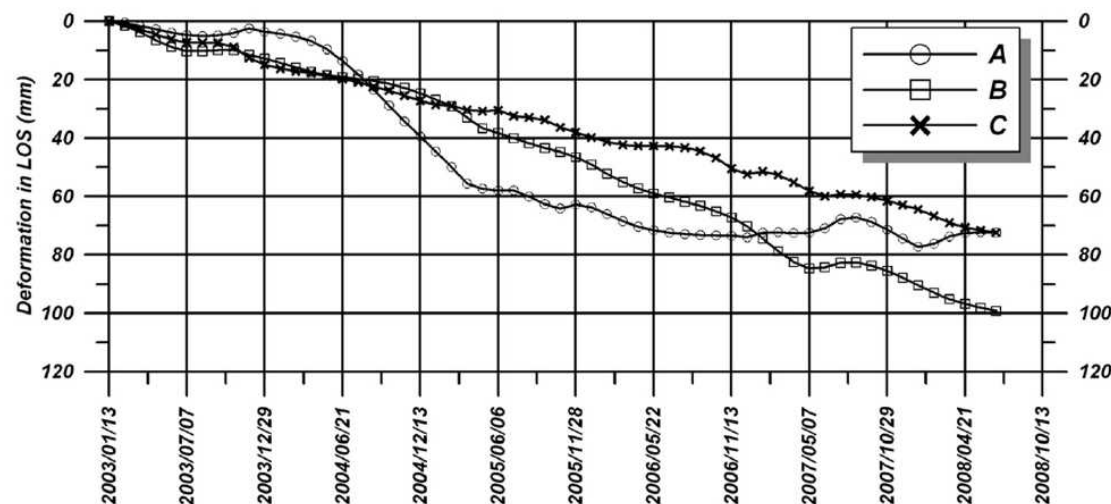
- JERS1 の SAR で干渉 SAR 可能
⇒ 1992 年から 1998 年の解析が可能
- SAR と水準測量の結果は概ね一致
- バイアスがあるが、その後解決

千葉県内陸部の地盤沈下を対象とした初期の解析成果

出口ほか (2009) : 干渉 SAR の時系列解析による長期地盤変動計測、日本リモートセンシング学会誌、 29 、 418-428.



- ENVISAT/ASAR
(2003 年～ 2008 年)
- C バンド
- DEM は SRTM3
- 空間分布は実測とよく合致 (C)



水準測量成果との比較
(千葉県 WEB から DL)

- C が茂原地域
- 13mm/ 年の変動

国土地理院の成果

ALOS-1 による成果を WEB、地理院地図で公開

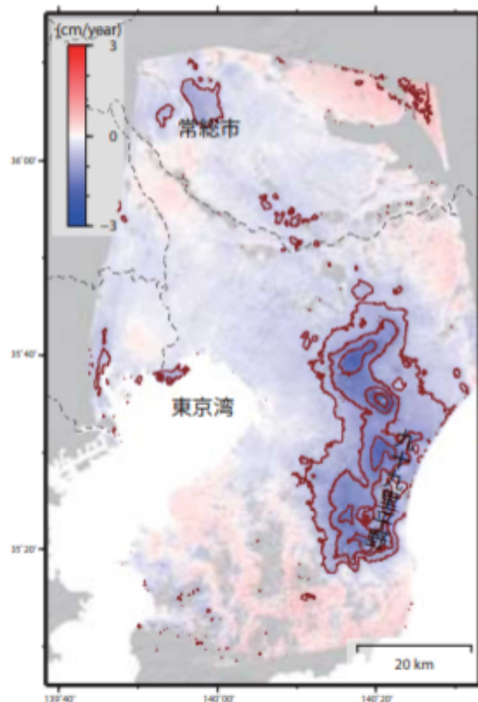


WEB/Tiff

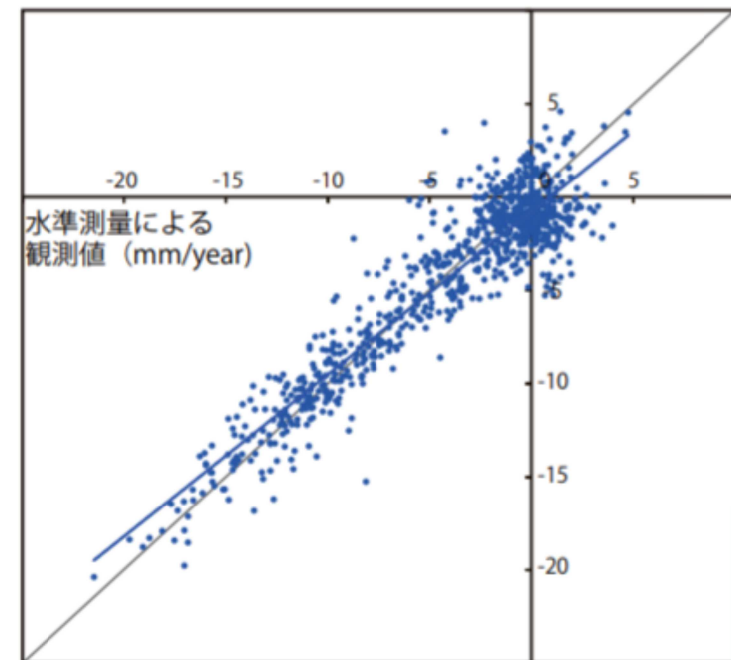


微小な変動を正確に把握します

多数の SAR 画像を用いて解析すると、長期間にわたり継続する微小な変動を検出することができます。



九十九里平野では、2006 年から 2011 年の SAR 画像を使った解析から、最大で年間 2cm 以上の沈降が検出されました。



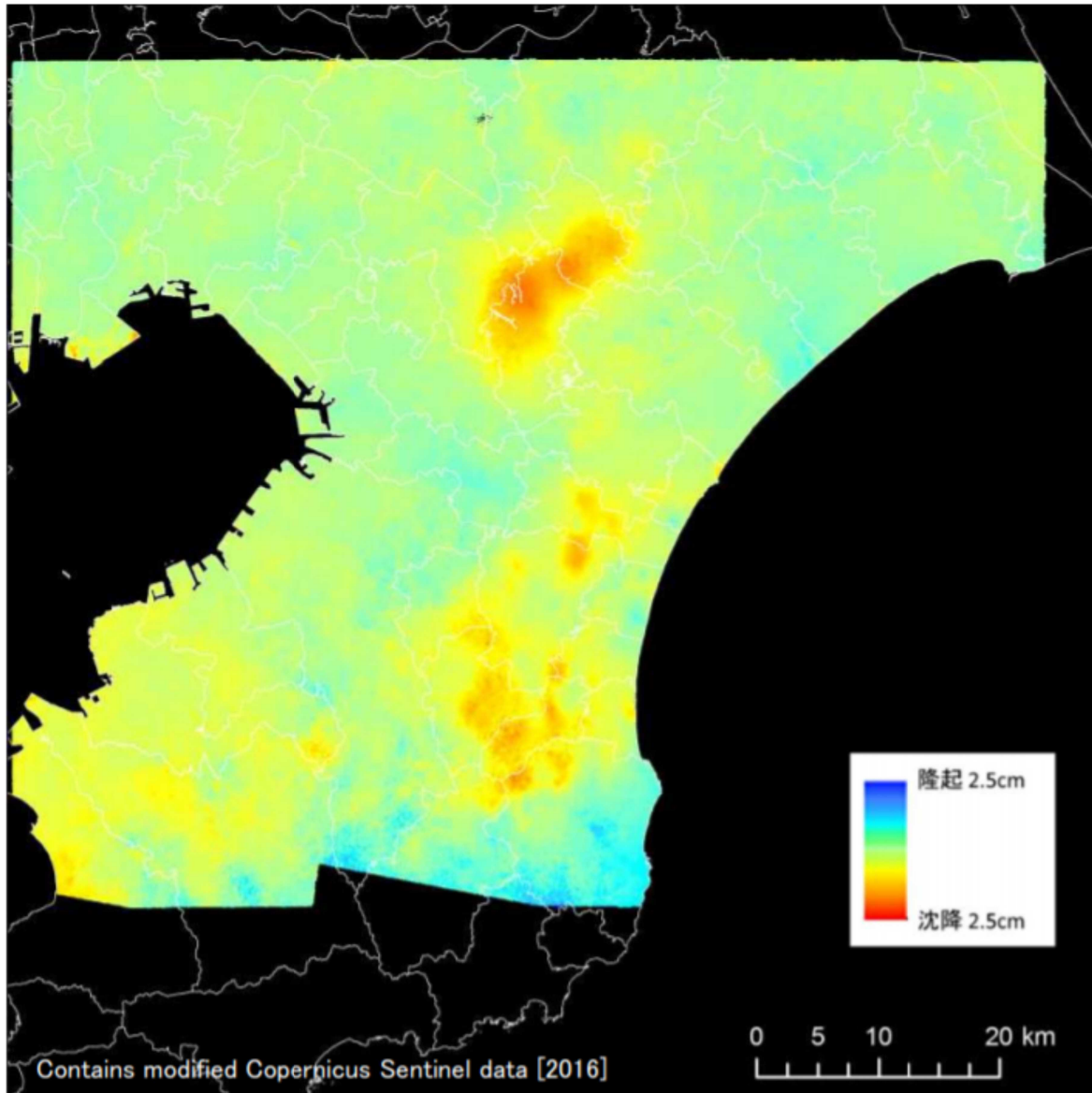
得られた九十九里平野の地盤沈下の速度は、水準測量により求めた速度とよく一致しています。

[https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/sub/pamph/GSISAR_pamphlet\(Japanese\).pdf](https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/sub/pamph/GSISAR_pamphlet(Japanese).pdf)

環境省の成果

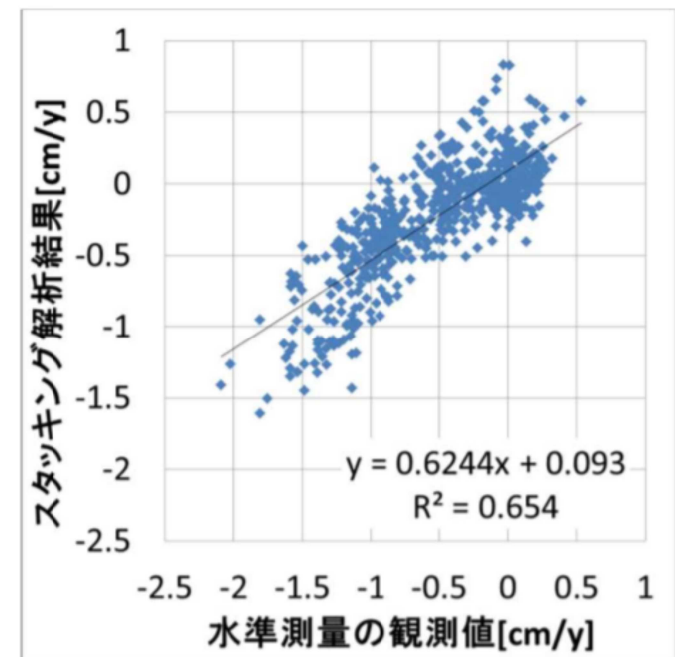
地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル 平成 29 年 3 月
環境省 水・大気環境局 土壌環境課 地下水・地盤環境室

ALOS-1、2、Sentinel-1(2014 年～) による成果



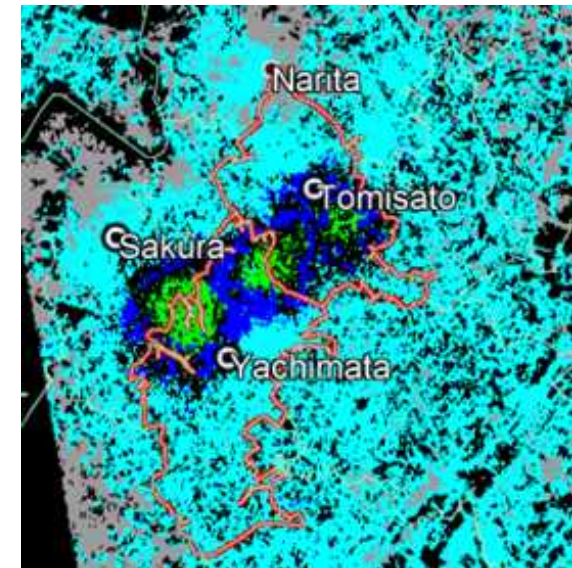
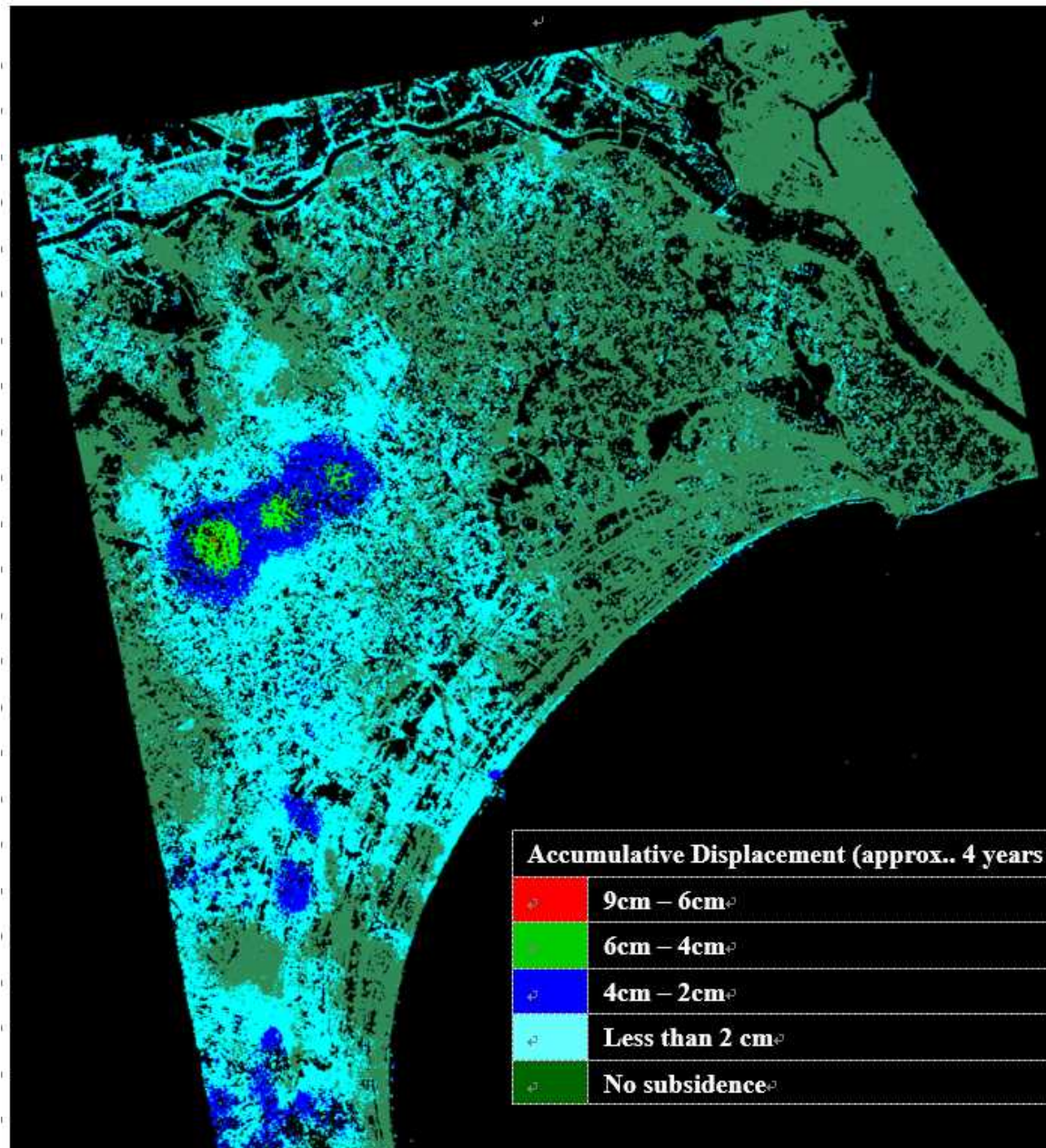
- ・ C バンド
- ・ スタッキング解析

2014 年 1 月～ 2016 年
1 月の沈下量



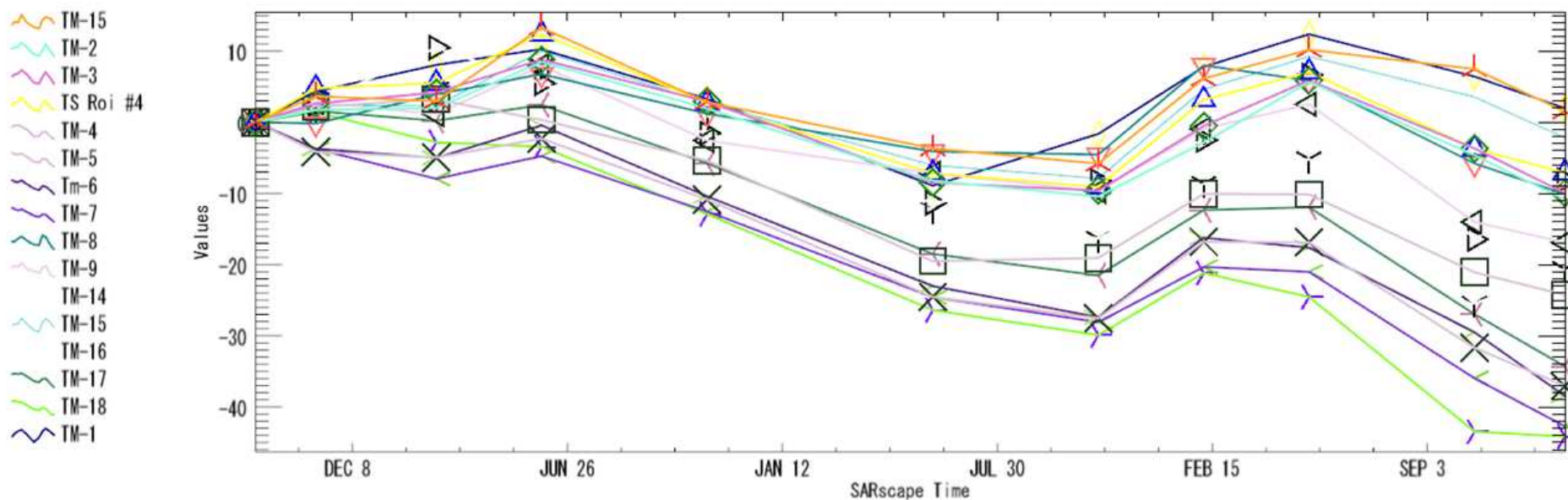
千葉県内陸部の地盤沈下を対象とした最新の解析成果 ALOC1,2

アイフマル、リチャ、劉、近藤（未公表資料）

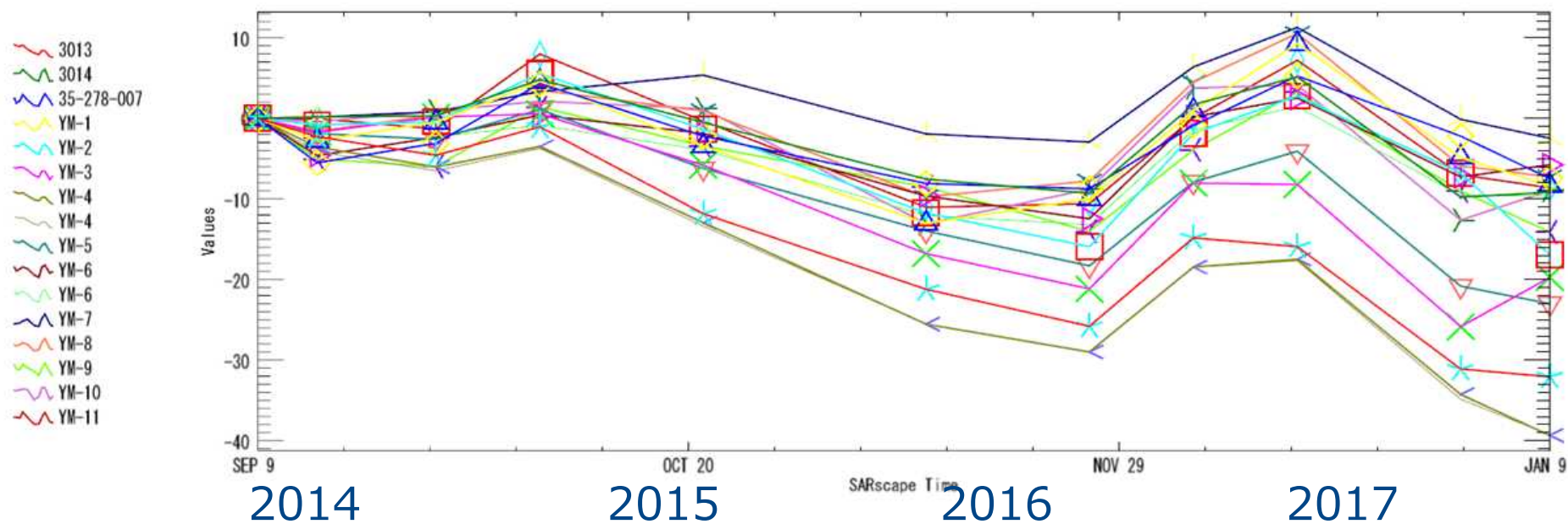


SBAS(Small Baseline Subset method、基線長が短い干渉画像のみを、組み合わせる手法)により求めた、2014年9月9日～2018年1月9日の間の沈下量

各水準点における地盤高の時系列（2014.9.9～2018.1.9）



(Preliminary results)



干渉 SAR の特徴と、他の手法との比較

(国土地理院の資料に加筆)

	干渉 S A R	G N S S	水準測量
地上の観測施設	不要	観測装置が必要	マンパワー
面的情報	可能	不可能	不可能
連続観測	不可能	可能	困難
変動量の絶対値	直接求められない	観測可能	観測可能
測定量の方向	一次元	三次元	一次元
観測時期	数十日に 1 回	24 時間可能	1 年に 1 回

- SAR 画像が得られたら、デスクトップワークで解析
- 面的情報が得られる
- 頻度は衛星の回帰日数によって制限されるが、繰り返し情報が得られる
- 水準測量が基本、この成果を補うものが干渉 SAR



おわりに

リモートセンシングからは事実がわかる

真実は、様々なステークホルダーの協働、様々な情報
との組み合わせによって明らかにできる

真実の先にあるものはなにか