

1-1

次なる SAR 観測研究に向けて

～地殻変動観測ツールとしての有効性と課題の再確認～

For challenges and ways forward into next SAR observation

～Looking back at the effectiveness and the subject for future study～

小林 知勝(国土地理院)

Tomokazu Kobayashi (Geospatial Information Authority of Japan)

要旨

地殻変動観測において、SAR はもはや無くてはならない道具として、その地位を確立しつつある。ALOS の登場とその後約 5 年間に及ぶ測地学・地球科学における目覚ましい活躍は、地殻変動観測ツールとしての有効性を知らしめるエポックメイキング的な出来事であった。残念ながら、ALOS は 2011 年 5 月にその運用を終了してしまったが、次期 L-バンド SAR 衛星、ALOS-2 の打ち上げを来年度に控えて、今一度、SAR を用いた測地観測がどのような知見や可能性を地殻変動解析研究に新たにもたらしてくれたのかを整理することは、次期 SAR 衛星の利用をより有効なものとするために重要なプロセスであろう。また、地殻変動観測ツールとしてより高度な利用のために何が問題であり、今後とりくむべき課題であるのかを、これまでの解析を通じて振り返る作業も重要であろう。

このような背景の下、本発表では、まず、地殻変動観測ツールとしての有効性を、特に内陸地震をターゲットとした解析結果に焦点をあてて振り返る。ここでは、福島県浜通りの地震(M7.0)などの解析事例を用いて、SAR 観測だからこそ明らかにできた諸特徴について触れ、その有効性を再確認する。続いて、より高度な SAR データの利用のために取り組むべき課題として、InSAR 画像等に含まれる誤差の低減を挙げ、この問題に関する大気/電離層起因の誤差の低減処理や SAR 時系列解析についての取り組みについて紹介する。

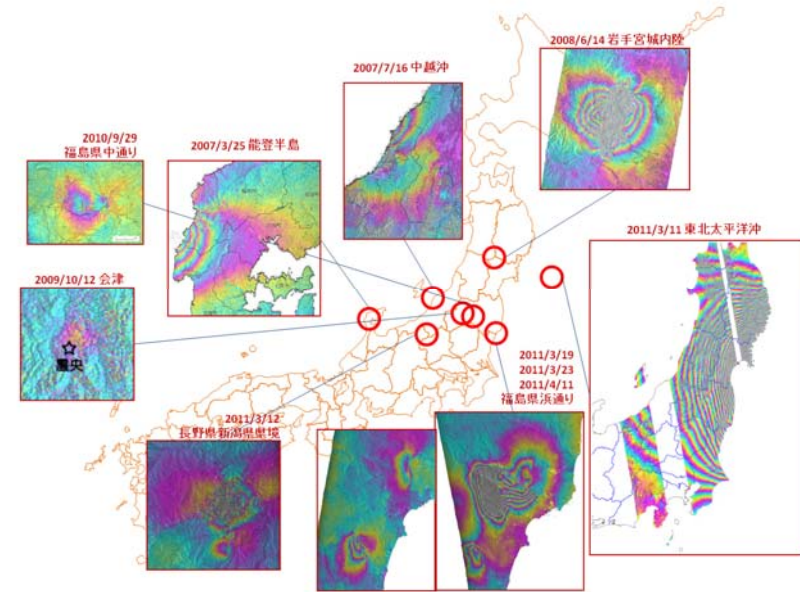


図1. ALOS の SAR 干渉解析から得られた地殻変動(国内の地震)

SARデータによる地殻変動観測の誤差原因とその特徴(概念図)

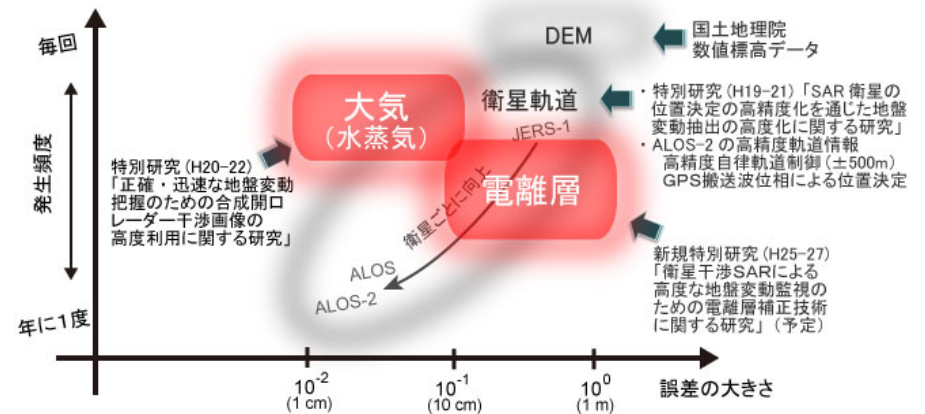


図2. 国土地理院における InSAR の誤差低減に関する取り組み

次なるSAR観測研究に向けて ～地殻変動観測ツールとしての有効性と課題の再確認～



小林 知勝

国土地理院

ALOSの長年にわたる活躍が、地震・火山・地盤沈下等の国土監視ならびに当該研究分野における新しい発見や発展に、多大なる貢献をもたらしました。JAXAならびに多くの関係者の方々のこれまでのご尽力に感謝の意を申し上げます。

本研究で用いたPALSARデータは地震・地盤変動データ流通及び解析ワーキンググループ(地震WG)、火山噴火予知連・衛星解析グループ(火山WG)からの提供を受けたものおよび国土地理院とJAXAの「陸域観測技術衛星を用いた地理空間情報の整備及び高度利用に関する協定書」に基づき購入したものです。PALSARデータの所有権は宇宙航空研究開発機構(JAXA)および経済産業省にあります。

科学技術・学術審議会建議「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の推進について」におけるSAR(抜粋)

1 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

(1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

ア. 日本列島域

○火山活動が活発化した場合には、火山周辺での機動的観測、航空機や無人測量船等による観測、**衛星搭載SAR(合成開口レーダー)**などの人工衛星によるリモートセンシング技術を活用し、陸域、海域での火山観測体制の強化を図る。

イ. 地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

○日本海溝・千島海溝沿いの地域や糸魚川－静岡構造線北部において、GPS及び**SAR**による観測を実施し、地殻変動分布を明らかにする。

○活動的な火山を優先して**地球観測衛星**、航空機による**SAR**等を利用して高精度な地殻変動の測量を実施する。

ウ. 東海・東南海・南海地域

○**SAR**及びGPSを用いて、定常的な地殻変動とその揺らぎを面的にモニターする。

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

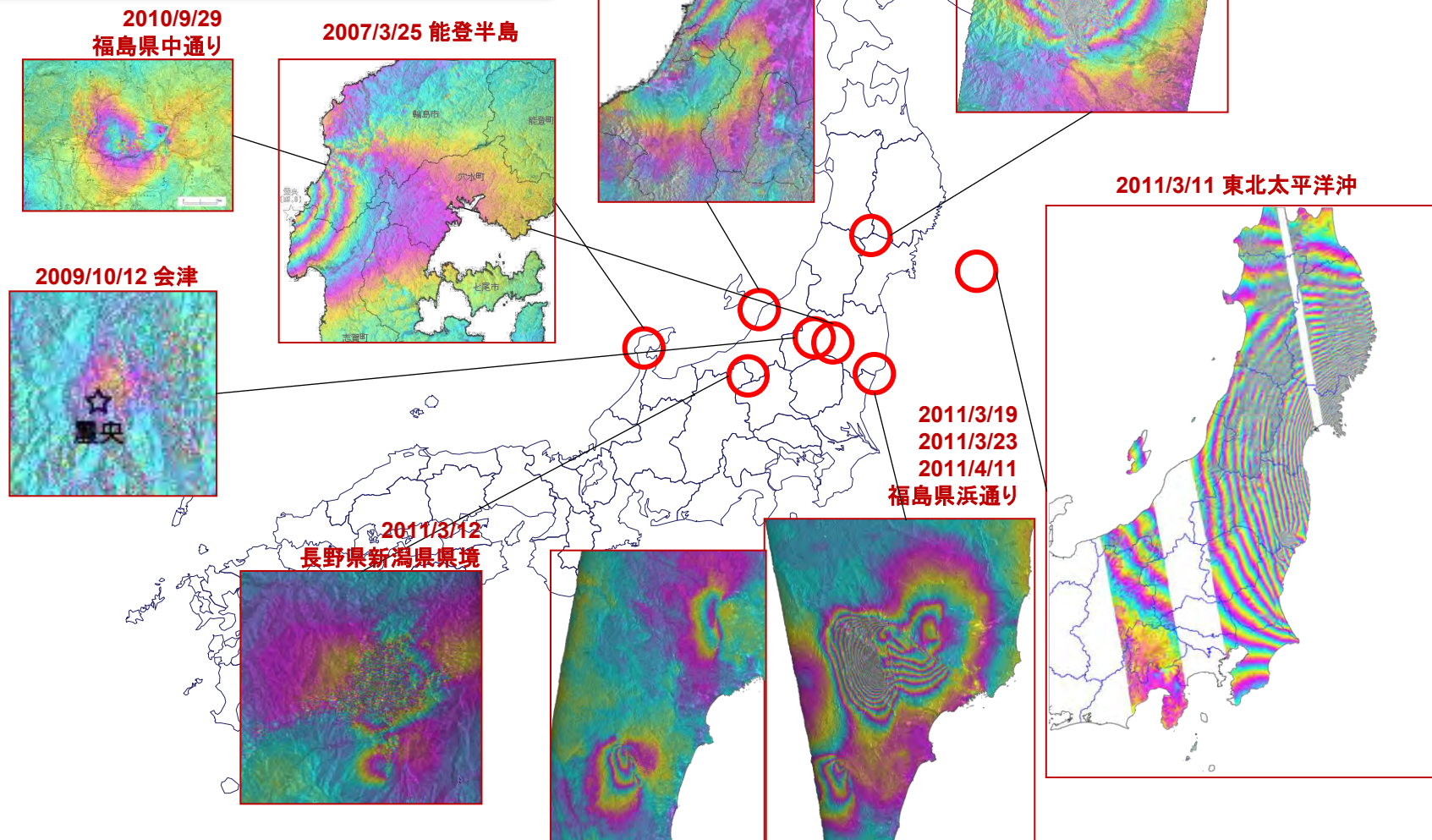
○地震、**SAR**,GPS, 海底地殻変動, 重力等の観測を充実させてプレート境界の滑りと固着の状態の把握に努める。

○GPS, 水準測量, 光波測距, **干渉SAR**等の地殻変動解析から、マグマ供給系を含む火山体の構造や状態及びそれらの時間的变化を明らかにし、マグマの上昇や蓄積を把握する

地震・火山活動を把握するための
基本ツールとして

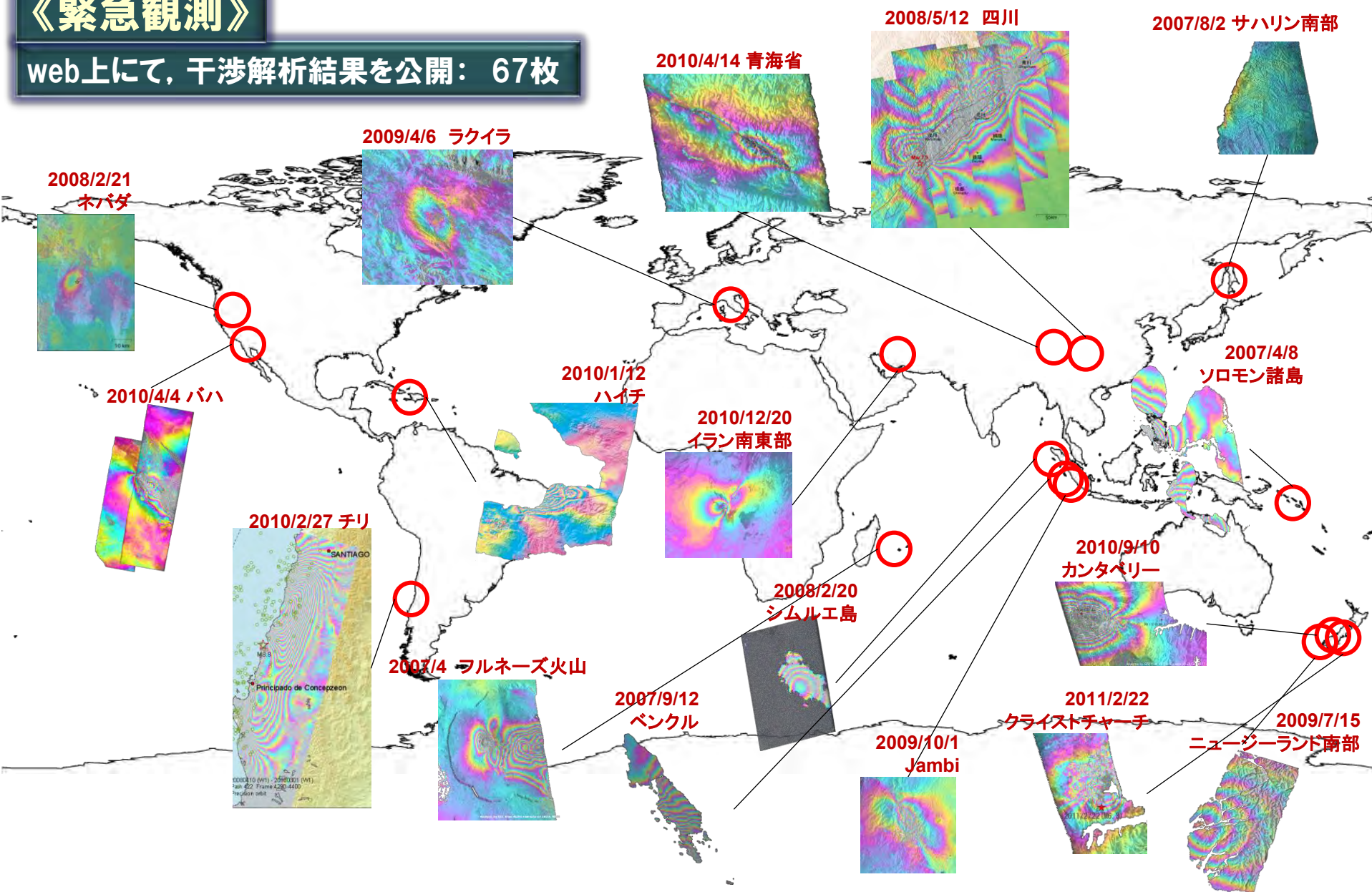
《緊急観測》

国土地理院のweb上にて、干渉解析結果を公開： 36枚 (2012/9/12現在)

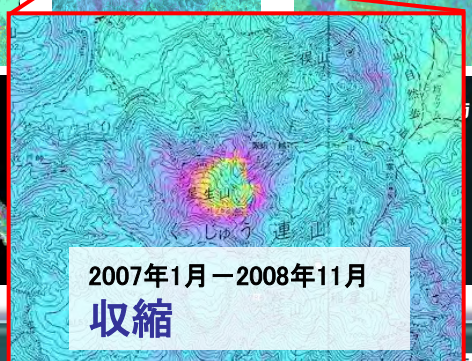
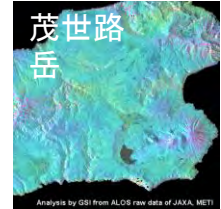
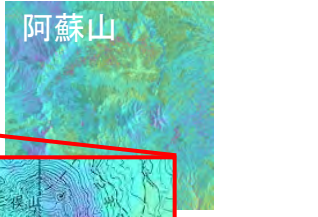
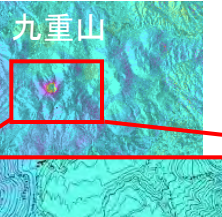
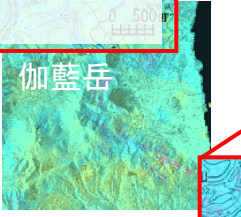
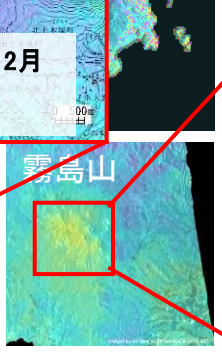
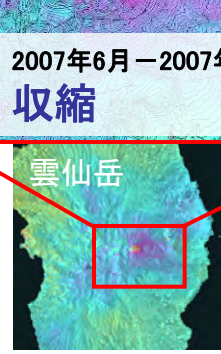
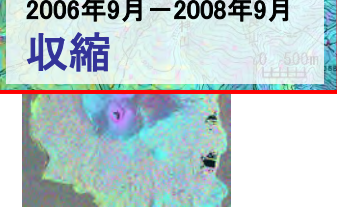
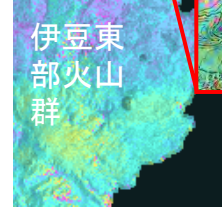
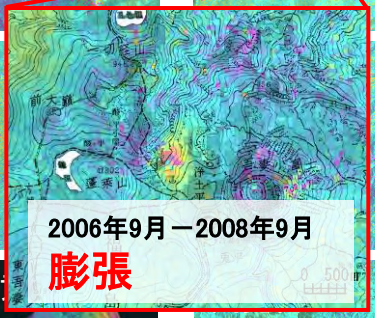
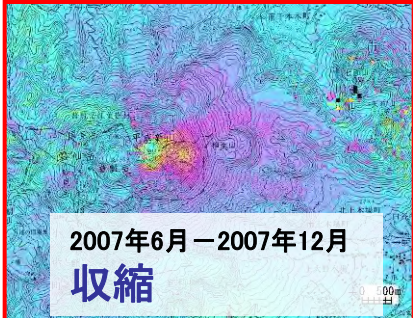
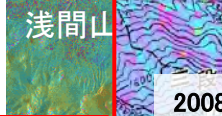
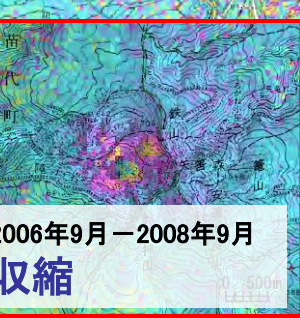
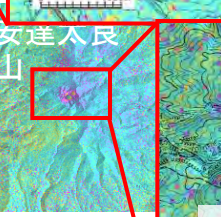
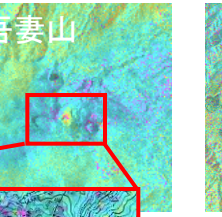
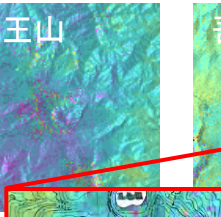
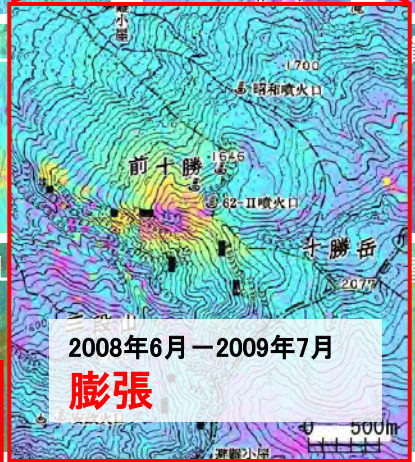
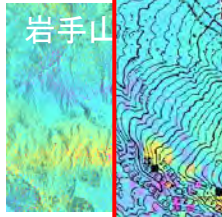
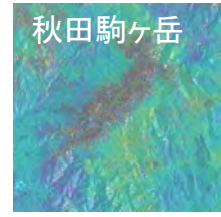
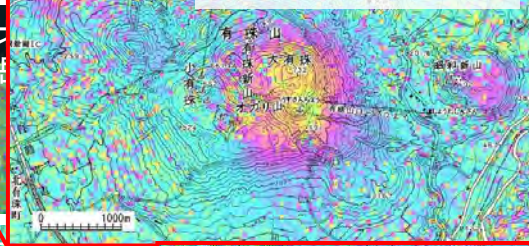
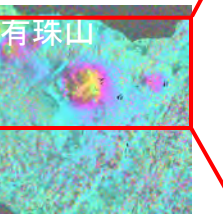
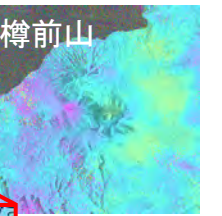
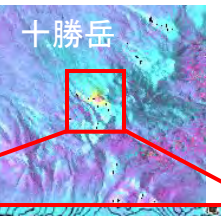
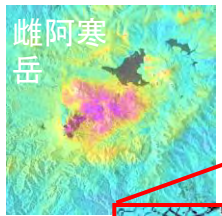
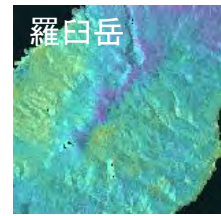


《緊急観測》

web上にて、干渉解析結果を公開： 67枚



ALOSによる地殻変動(火山)の監視【国内】 [2006-2011]



Web上に、十ヶ所詳細結果を公開: 561枚 (2012/9/12現在)

宇宙基本計画におけるSAR干渉の国土監視

A アジア等に貢献する陸域・海域観測衛星システム

①社会的ニーズと今後10年程度の目標

(a) 公共の安全の確保

(略)

観測の高度化のニーズ

「地殻変動の予測監視」というニーズに対して、世界有数の地殻変動(地面の動き)が活発な地域に位置するわが国では、全国約1,200箇所に設置された電子基準点(GPS衛星データを受信)による監視が行われている。一方**レバンドレーダセンサ**活用の実証的な取組も進められてきたものの、衛星の更新に間が空いたために数年間観測できない期間があったこと、また撮影頻度が少ないことから、まだ予測や監視に十分に活用できていない。今後は地表面の情報を広域かつ長期間にわたり継続的・高頻度で取得することで得られる画像情報の面的な解析結果を、電子基準点等による特定の地点の情報と組み合わせることで活用することにより、**地殻変動を1センチメートル程度の精度で面的かつ稠密に監視**(すなわち点の把握から面の把握へ向上)する。特に大規模な地殻変動の予兆が認められたり火山の活動度が高まったりした場合には、GPSによる現地での臨時観測等と合わせ、少なくとも3時間毎に対象地域の監視を行い、今後の地殻変動や火山活動の推移に関する予測精度を向上させる。(以下略)

(b) 国土保全管理

(c) 食糧供給の円滑化(農業と沿岸漁業等の高度化)

(d) 資源・エネルギー供給の円滑化

(e) その他

B 地球環境観測・気象衛星システム

C 高度情報通信衛星システム

D 測位衛星システム

E 安全保障を目的とした衛星システム

F 宇宙科学プログラム

G 有人宇宙活動プログラム

H 宇宙太陽光発電研究開発プログラム

I 小型実証衛星プログラム

衛星SARを用いた地殻変動観測が、
国土監視のための重要な課題に。

＝地震・火山観測におけるSAR＝

1. 内陸地震解析におけるSAR観測の威力

- ・2011年福島浜通りの地震を振り返る
- ・内陸地震観測における課題

地殻変動観測
としての有効性

2. 地震・火山観測の高度化に向けて

- ・大気(水蒸気)起因の誤差への取り組み
- ・電離層擾乱起因の誤差への取り組み
- ・時系列解析への取り組み

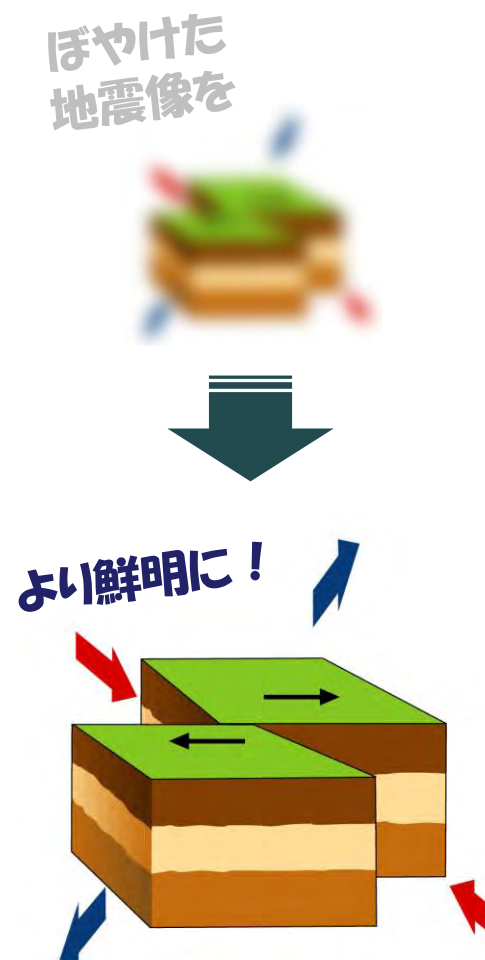
さらなる道具の
研鑽の為に

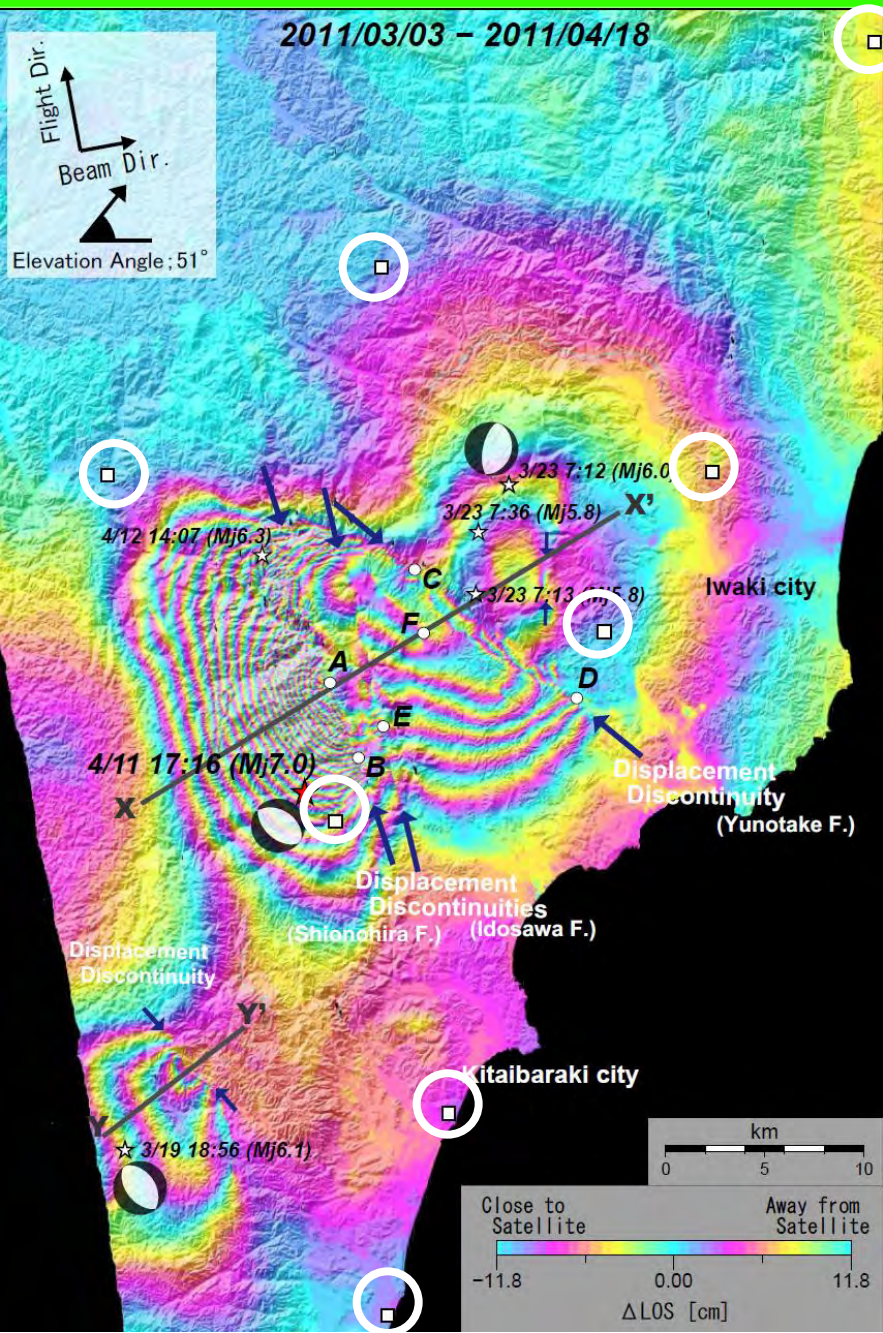
Far-Field から Near-Field の観測へ

破壊の複雑性

- ・断層（地表地震断層）の位置の詳細把握
- ・破壊の詳細（メカニズムの決定、破壊の複雑さ）
- ・破壊の位置の把握
- ・中規模の内陸地震像をより鮮明に

etc...



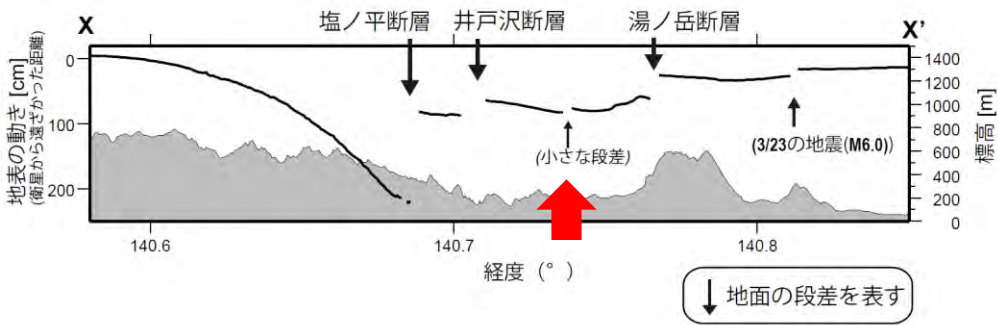


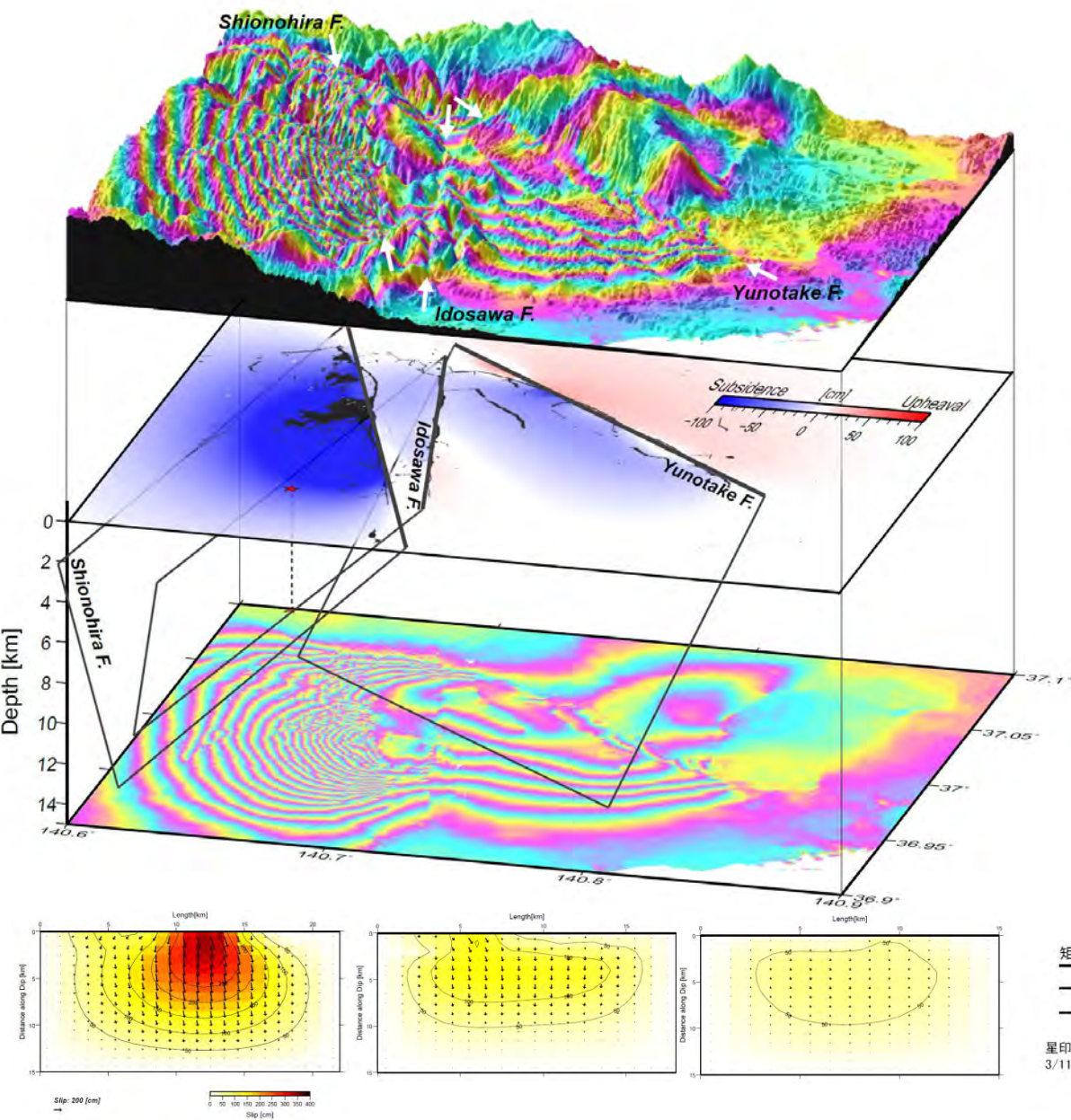
破壊の複雑性

地表地震断層



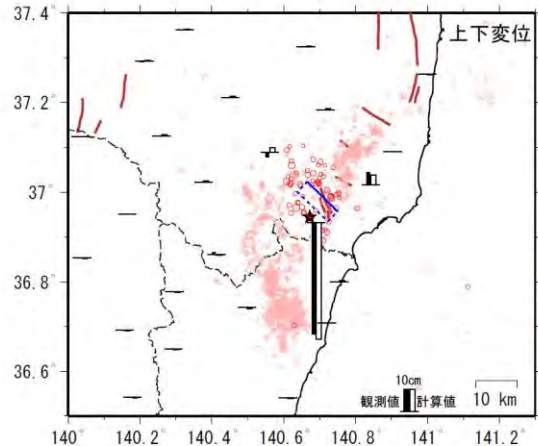
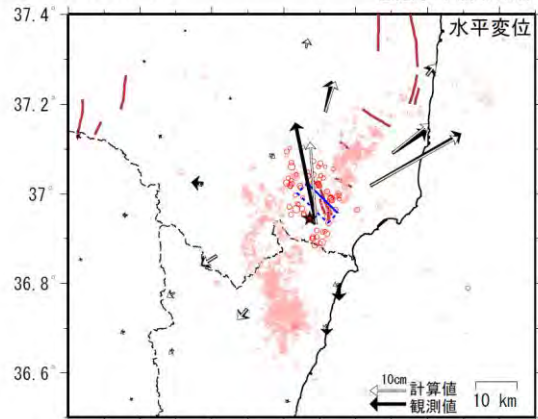
地表変位の不連続





2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)の震源断層モデル(暫定)

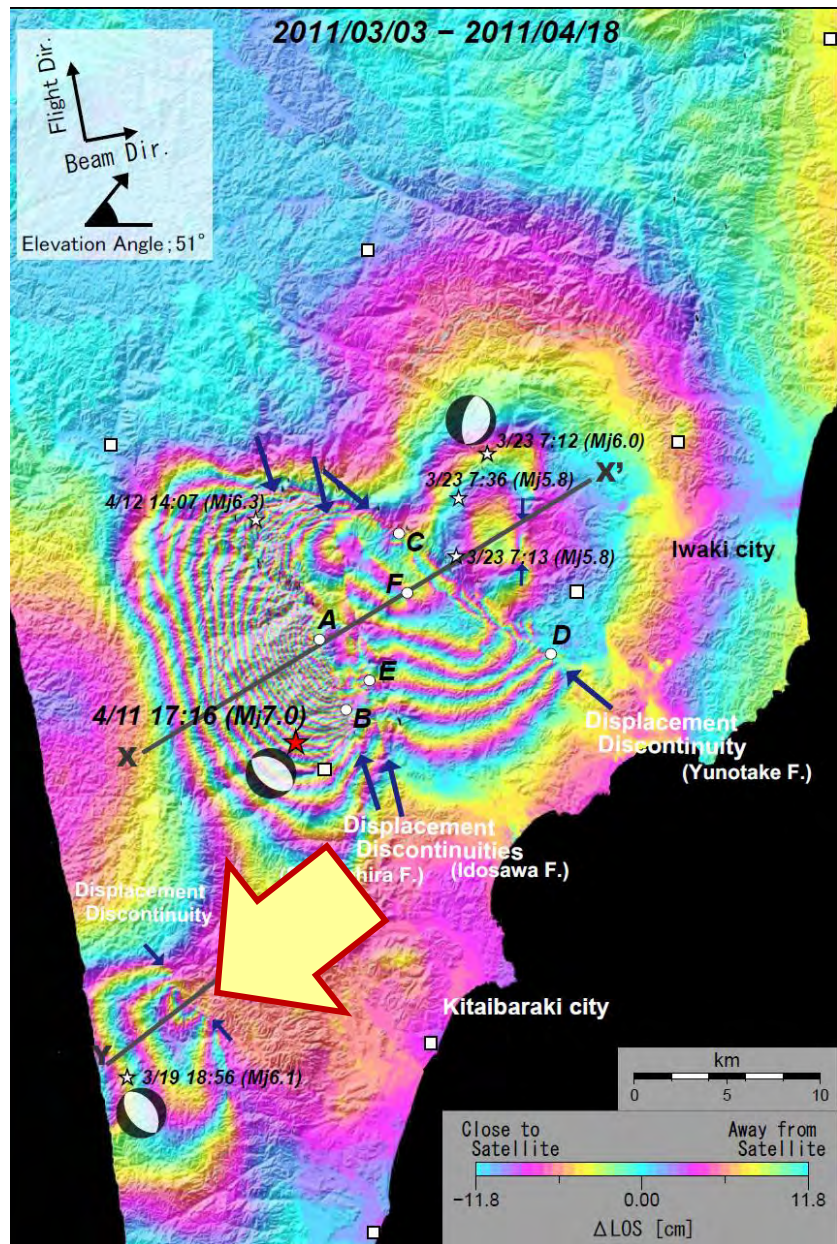
基準期間: 2011/04/10 (R3)
比較期間: 2011/04/12 (R3)
固定局: 八郷(93002)



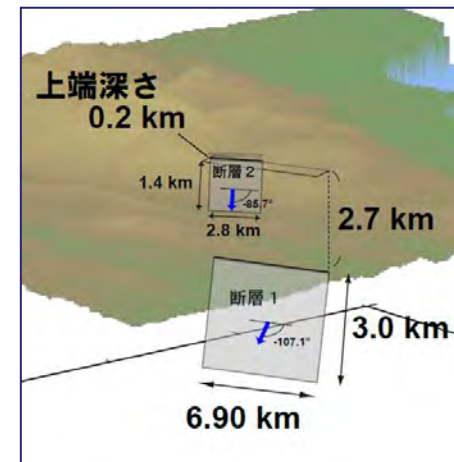
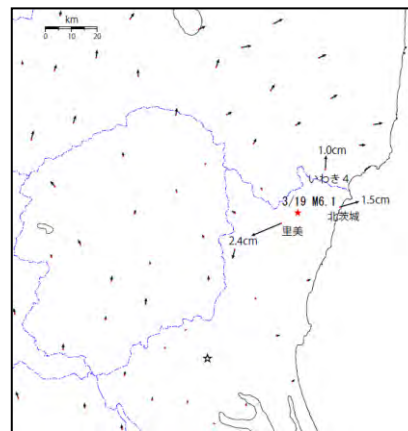
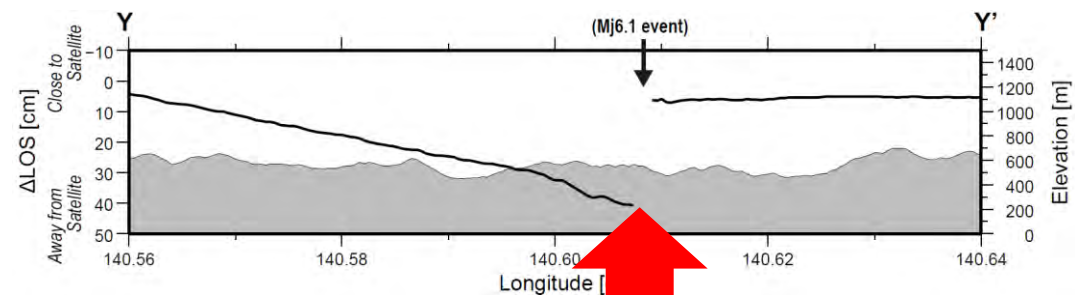
矩形断層一様すべりを仮定した断層パラメータ

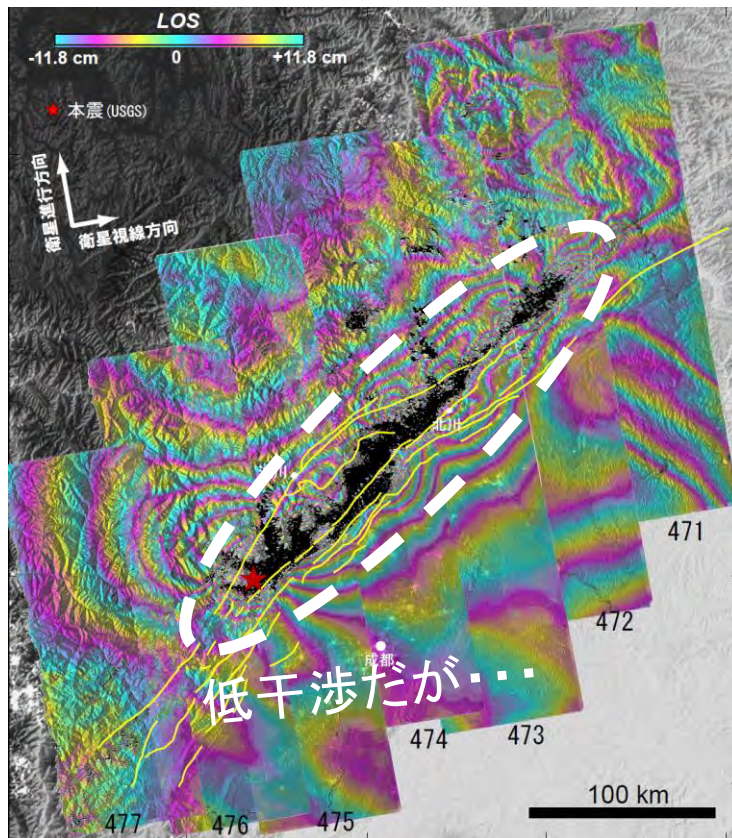
緯度	経度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜角	滑り角	滑り量
37.024°	140.665°	0.3km	10.5km	7.4km	134°	62°	-90°	4.51m

モーメントマグニチュード(Mw) 6.61 (剛性率は30GPaを仮定)
星印と赤丸は、それぞれ気象庁一元化震源による福島県浜通りの地震の震央と余震分布(4/11のみ)。薄い赤は、3/11からM7.0の地震発生までの震源分布(M $\geq$ 1, 深さ15km未満)。活断層分布は、新編日本の活断層(1991)による。

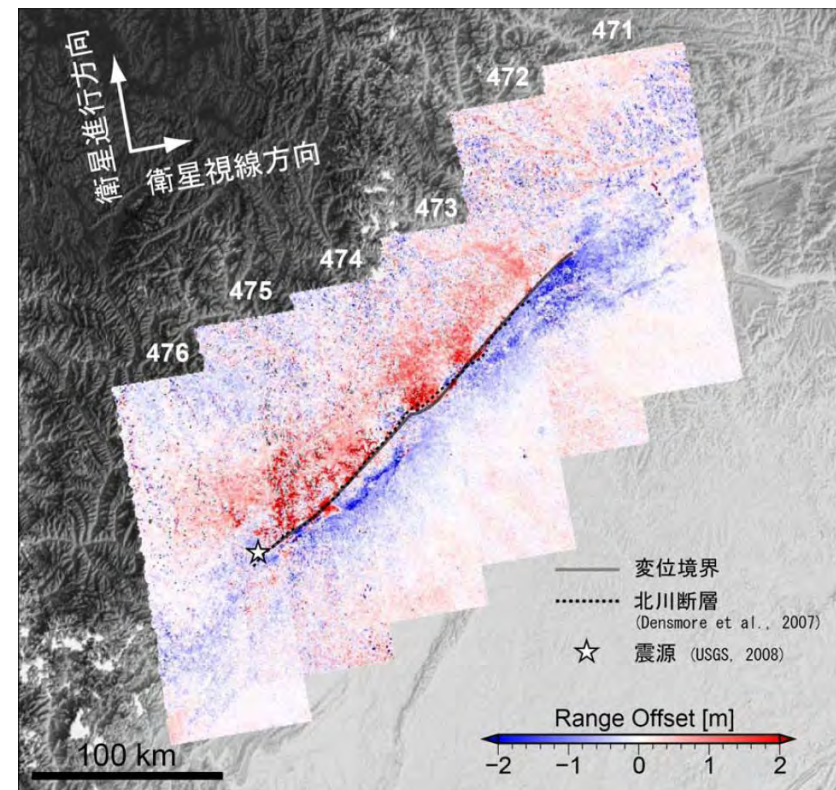


M5後半からM6級の地震像も詳細に





ピクセルオフセットにより
震源域近傍の変動抽出が可能



ALOS-2への期待 ～高空間分解能への期待～

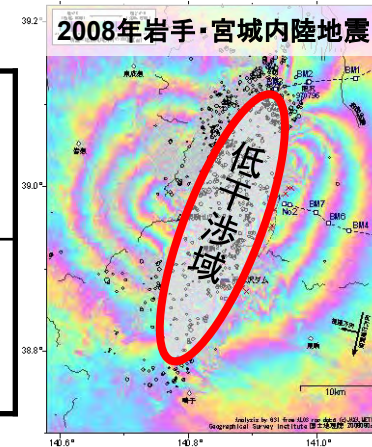
ALOS-2高分解能[3m]

震源断層近傍の地殻変動をより高い精度で観測可能に

InSAR

Tobita, 2006より

$\left(\frac{\partial \Delta \rho}{\partial \rho}\right)_c = \frac{\lambda}{2R_{res}}$	ERS-1	Envisat	Radarsat	JERS-1	ALOS FBD	ALOS FBS	ALOS-2 3mモード
地殻変動 勾配臨界値 (mm/m)	2.9	3.0	5.7	11.7	11.0	22.1	~66



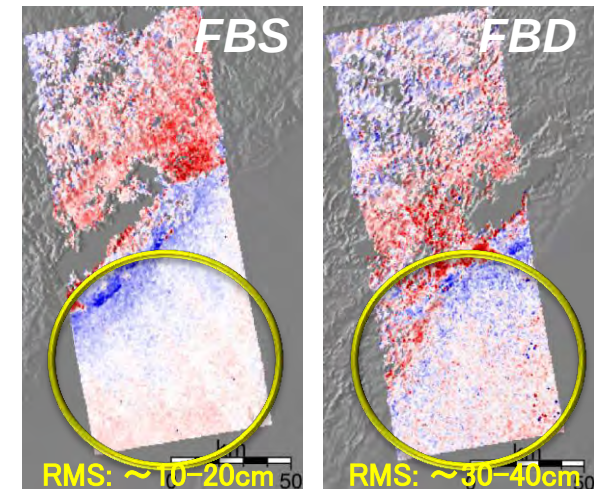
ピクセルオフセット

画像マッチングにおける位置あわせの精度向上

1/32ピクセル分解能の場合

	ERS-1	ALOS FBS	ALOS-2 3mモード
計測精度(cm)	~25	~15	~5

空間分解能がよいと、短波長ノイズが軽減される

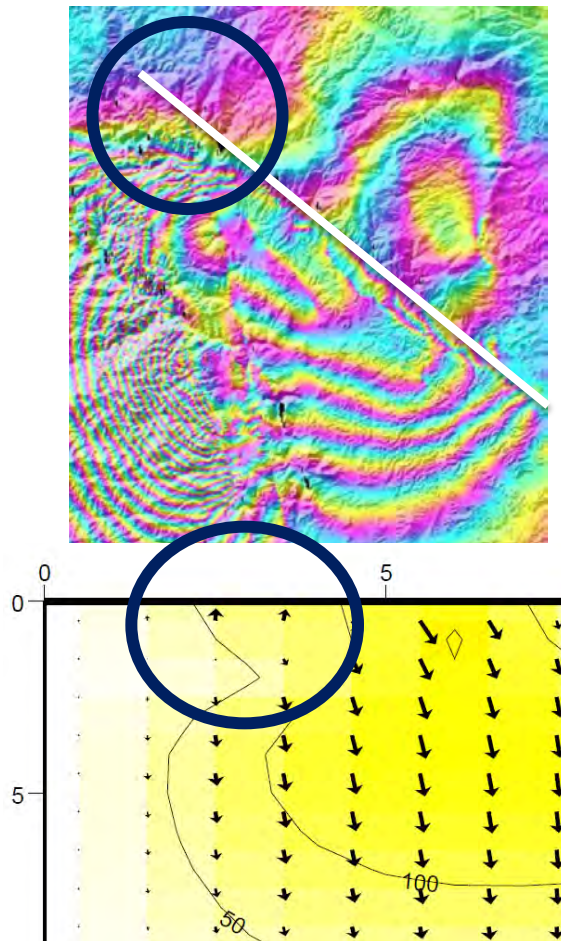


2008年中国四川省地震の解析事例

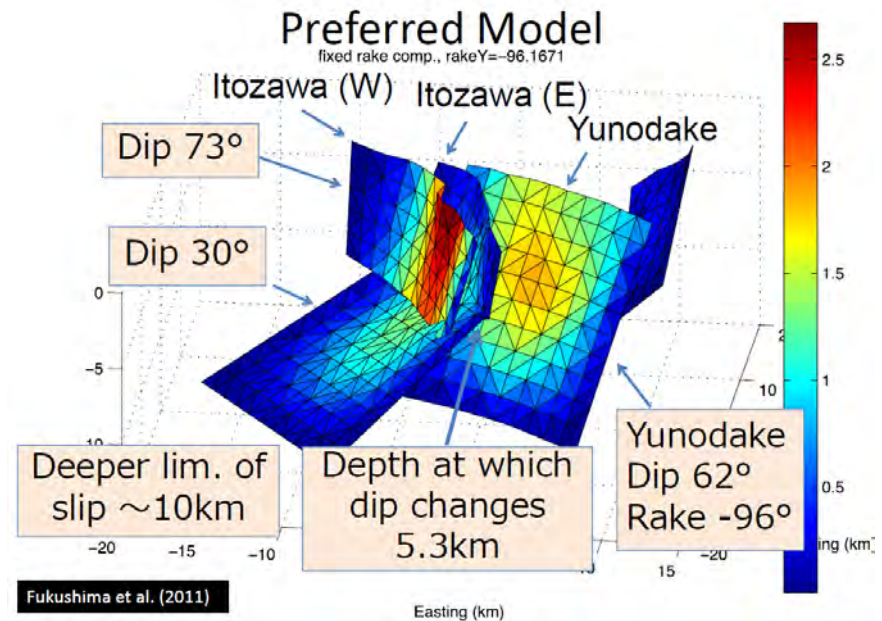
モデリング手法の高度化

せっかく手に入れた詳細な情報を生かしきれていない
(曲がった走向を表現できない, 非弾性変形・・・)

■ 矩形断層モデルの限界・・・



非平面断層によるモデリング



196回地震予知連京大資料より (福島さん解析)

地盤変動観測の高度化に向けて

地殻変動
ユーザーの要求

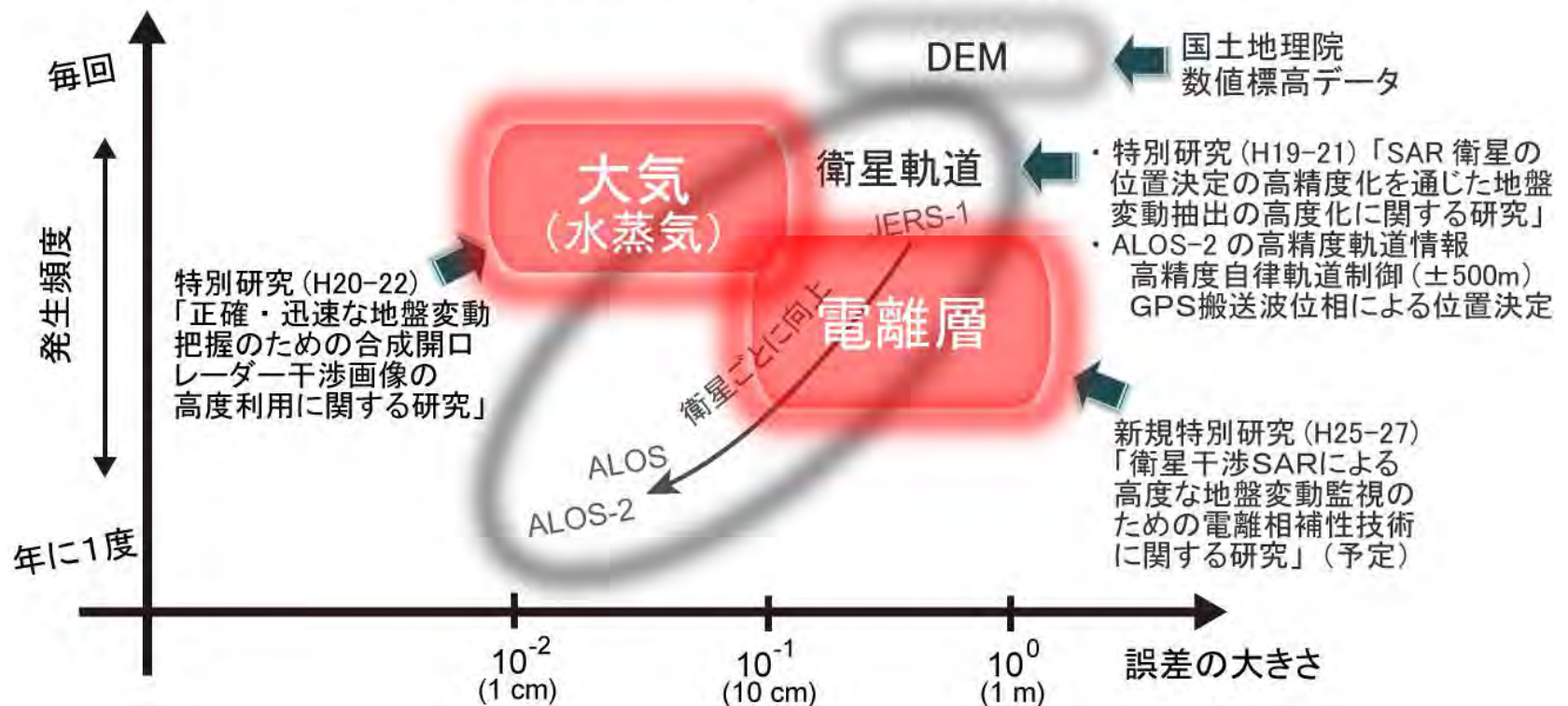
地盤沈下, 地震・噴火の準備過程に伴う地殻変動

→ **mm~cm**精度でのモニタリングが必要

(宇宙基本計画: 今後10年程度の目標として「地殻変動を**1センチメートル**程度の精度」で監視)

現状 電離層, 大気(水蒸気)などの影響による**誤差**が, 正確な地盤変動把握の妨げに

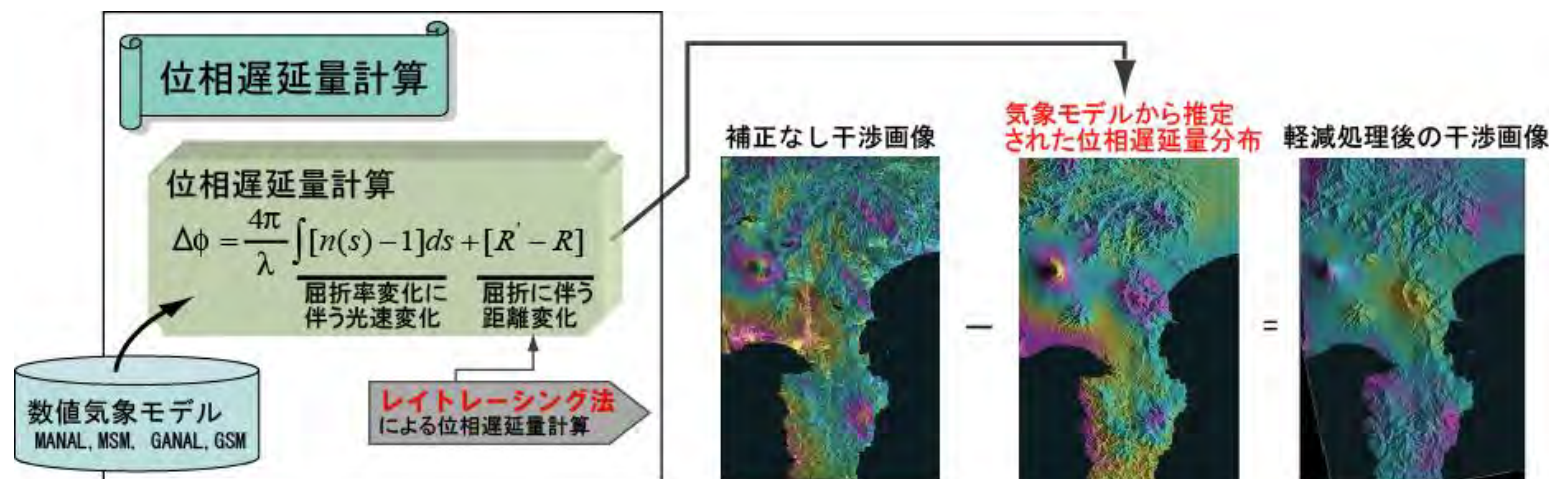
SARデータによる地殻変動観測の誤差原因とその特徴 (概念図)



数値気象モデルを用いた大気遅延誤差の低減の試み

大気遅延誤差の低減処理

干渉画像中に含まれる大気中水蒸気起因の誤差(大気遅延誤差)を
数値気象モデルを用いて低減



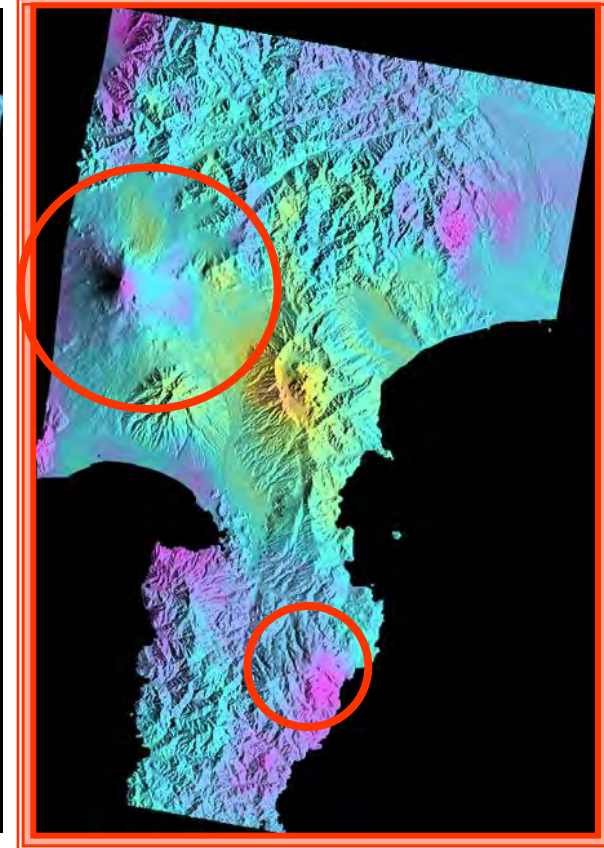
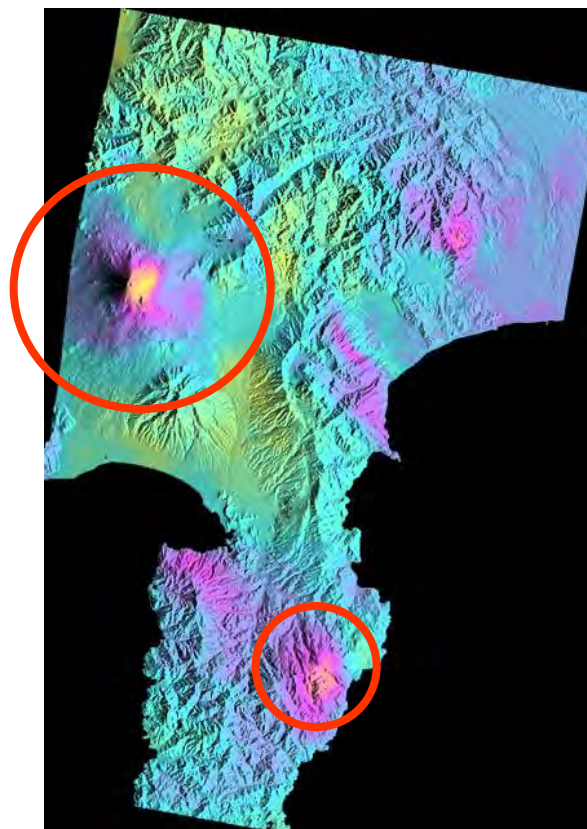
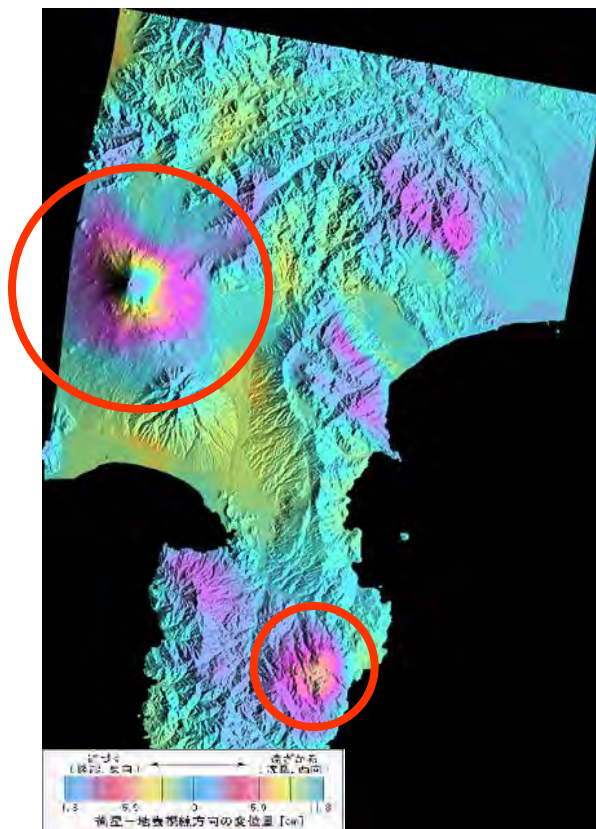
$$N = (n - 1) \times 10^6 = \underbrace{k_1 \frac{P_d}{T}}_{\text{乾燥大気}} + \underbrace{\left(k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right)}_{\text{湿潤大気}} + \underbrace{\frac{K}{f^2} TEC}_{\text{電離層}} + \underbrace{CW}_{\text{水(液体)}}$$



補正なし

標高相関補正

数値気象データ



遅延量: 富士山 13cm → 3cm / 伊豆半島・天城山 5cm → 2cm

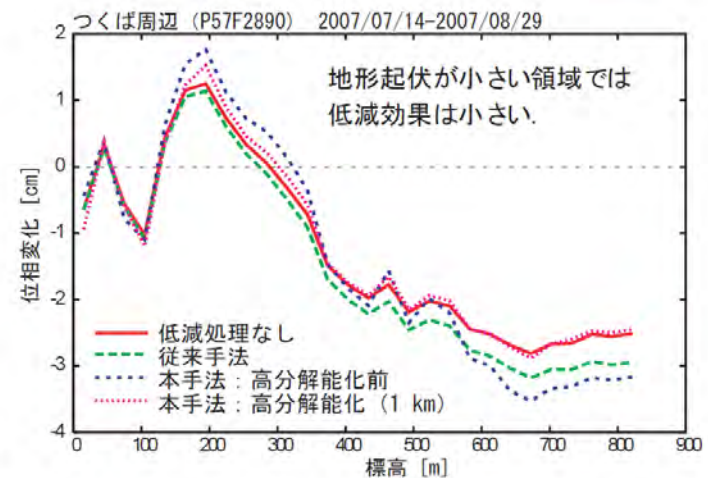
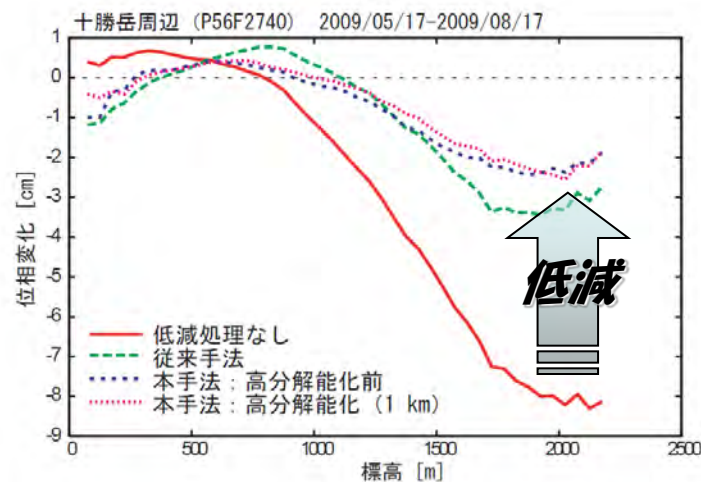
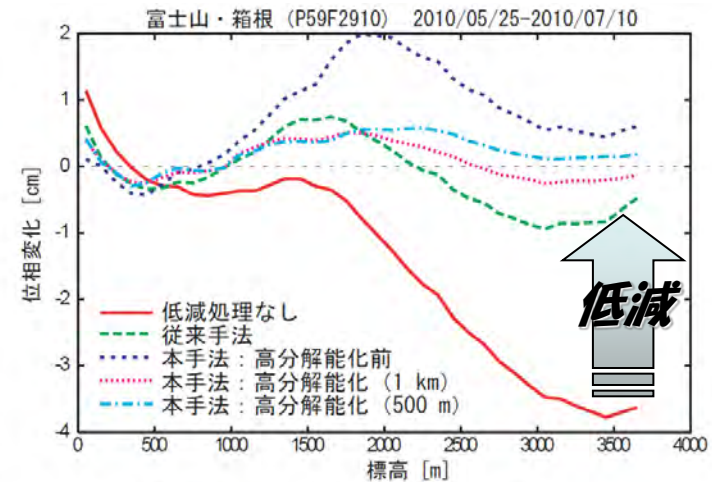
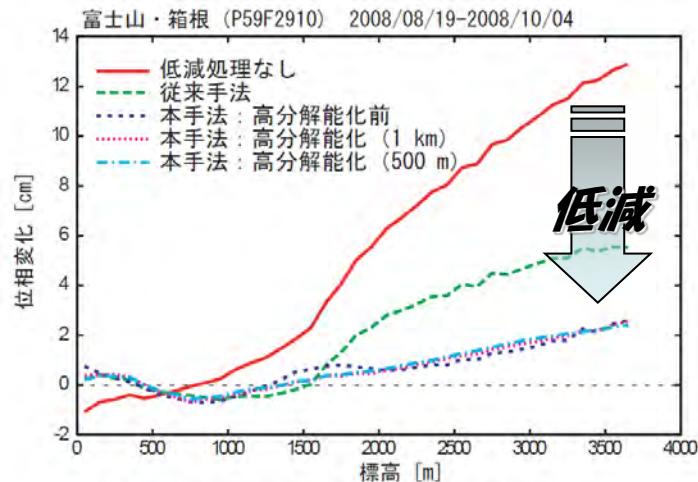
富士・伊豆 P59F2910
2008/8/19-2008/10/4

〔標高相関補正では軽減困難だった誤差が軽減される〕

低減処理の効果 ～標高と大気遅延誤差の関係～

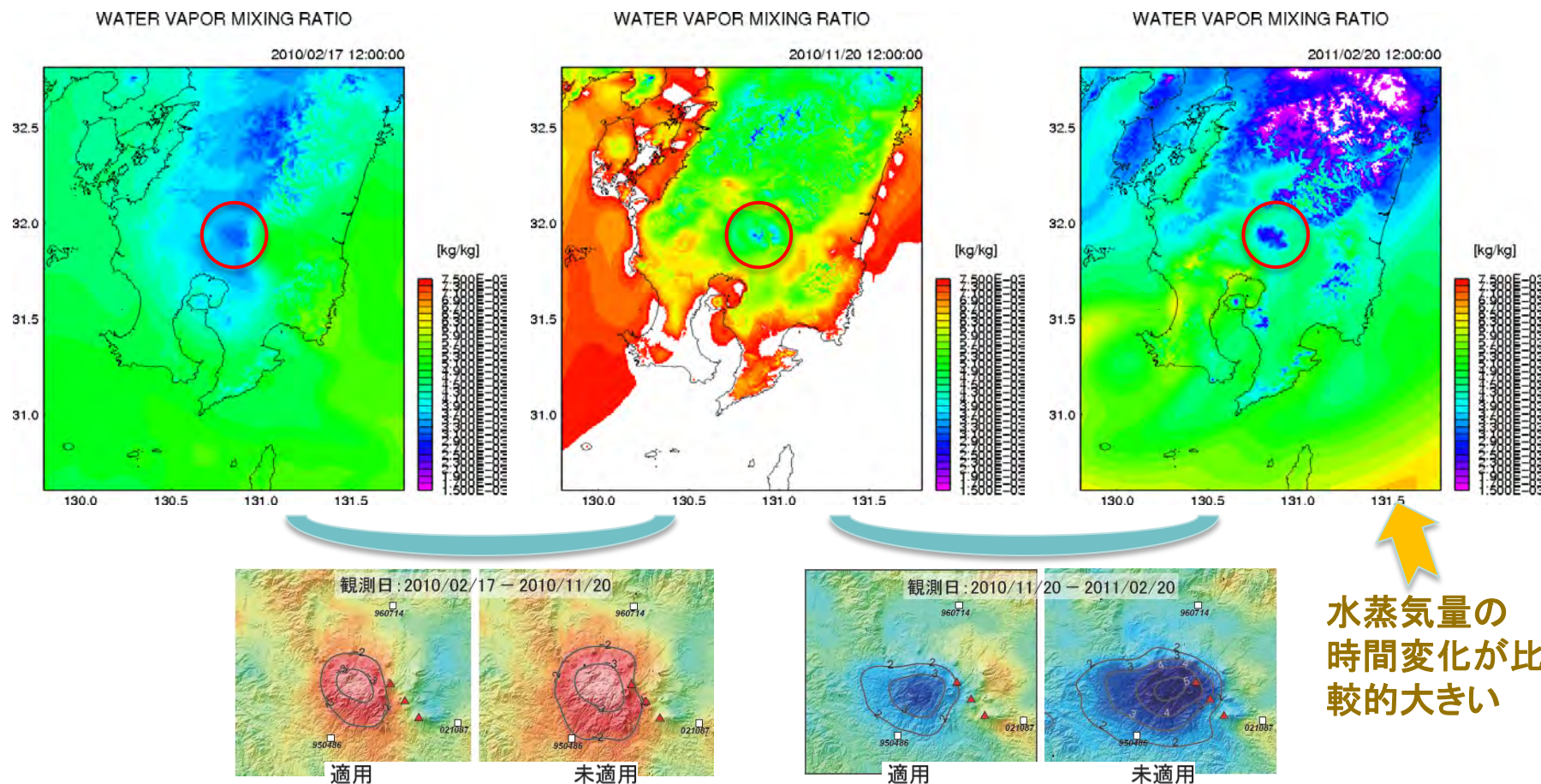
【標高の高い領域で、数値気象モデルによる低減処理は効果を発揮】

▼位相のばらつきが2cm程度の領域では低減効果は小さい。



数値気象モデルの水蒸気分布(混合比)

12:00~15:00(UT)の数値気象モデルから計算した水蒸気混合比分布の時間変化(CReSS使用)
(※SAR観測:13:45(UT)頃)



水蒸気量の
時間変化が比
較的大きい

GPS : -1.0cm
SAR(低減処理適用): -1.3cm
SAR(低減処理未適用): -2.3cm

GPS: +0.8cm
SAR(低減処理適用): +1.8cm
SAR(低減処理未適用): +2.3cm

ALOS-2への期待 ～大気遅延誤差低減効果向上への期待～

**SAR観測時刻と数値気象モデルの解析時刻が同じになる
→ 低減処理の効果向上につながるか！？**



《ALOS》

観測時刻： 10:30/22:30 (LT)

数値モデルの解析時刻から一番外れた時間帯

《ALOS-2》

観測時刻： 12:00/24:00 (LT)

数値モデルの解析時刻と**同じ**時間帯

＜現状の対処法＞

- 時空間的に線形補間
- 数値気象モデルを高分解能化

ALOS-2とは直接関係しませんが・・・

＋高解像度局所モデル（2kmメッシュ）にも期待

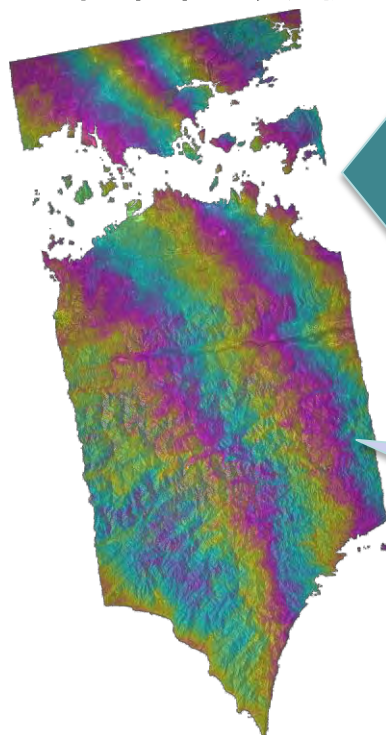
GEONETを利用した誤差低減処理技術の開発の試み(予定)

問題点

電離層擾乱(Δ TEC)のLバンドSARへの影響大 [Cバンドの約20倍の影響]

電離層擾乱が生む見掛けの位相変化 ~理論計算値(1TECUの場合)~
L-band (1.27GHz) $\rightarrow$ 50 cm / C-band (5.3GHz) $\rightarrow$ 2.8 cm

四国東部の観測例

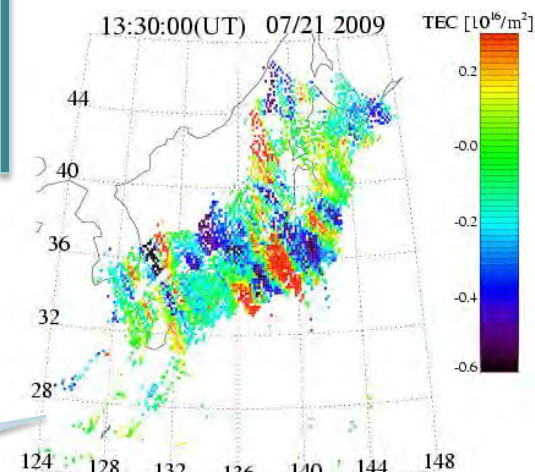


GEONETによる電離層
電子密度(TEC)情報を
利用した誤差低減

地殻変動とは異なる見かけ
の位相変化(30cm以上)

SAR干渉画像で見られ
る縞状のパターンと類似

GEONETで観測されたTEC擾乱

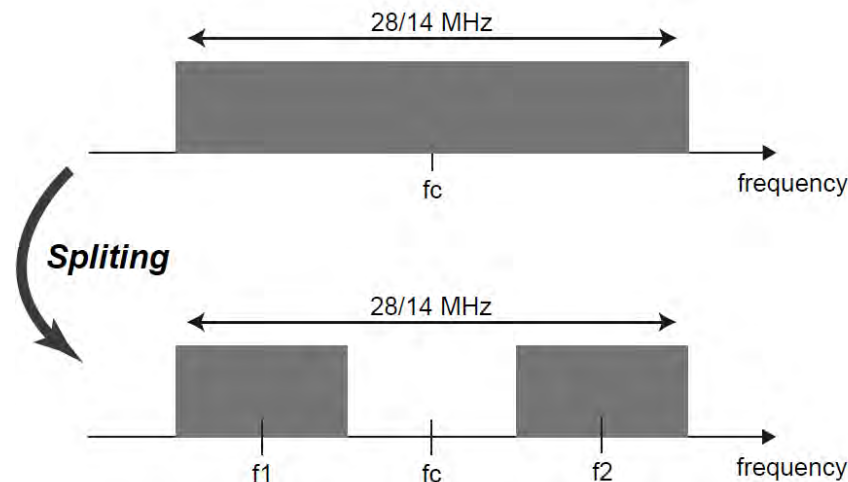


(<http://stegps.kugi.kyoto-u.ac.jp/> より)

※TEC(Total Electron Content): 全電子数

「衛星干渉SARによる高度な地盤変動監視のための電離層補正技術に関する研究(H25-27)」

帯域を2つに分割して、各帯域の干渉処理結果の
 ΔTEC の影響の違いを利用



$$\phi_c = \frac{2f_c}{c} \Delta R + \frac{2K}{cf_c} \Delta TEC$$

$$\phi_1 = \frac{2f_1}{c} \Delta R + \frac{2K}{cf_1} \Delta TEC$$

$$\phi_2 = \frac{2f_2}{c} \Delta R + \frac{2K}{cf_2} \Delta TEC$$



$$\phi_{iono} = \frac{f_1 f_2}{f_c} \frac{f_2 \phi_1 - f_1 \phi_2}{(f_2^2 - f_1^2)}$$

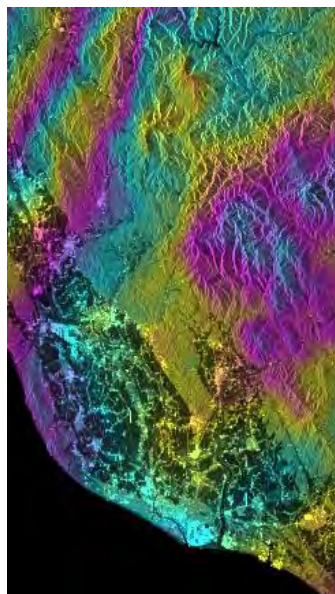
Range Split-spectrum による低減処理例

(Cross Track) InSAR

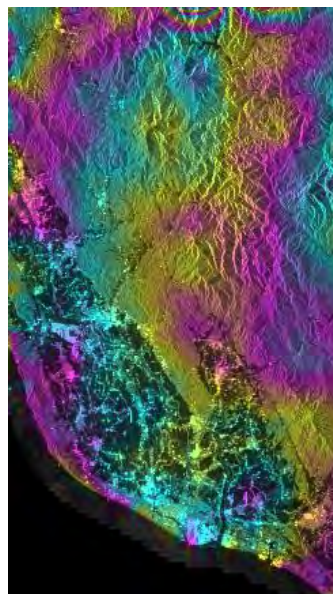
Ionosphere-related noise

Noise-corrected image

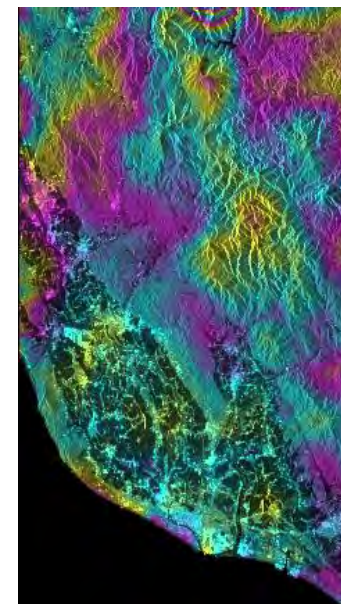
電波照射方向
衛星進行方向
(Azimuth)



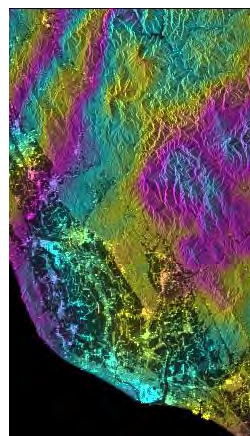
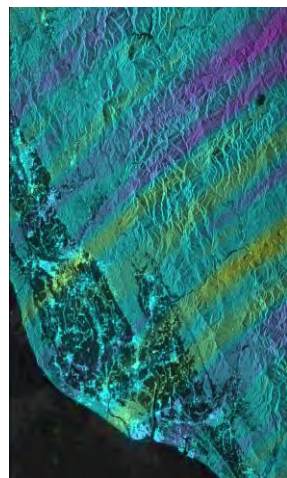
—



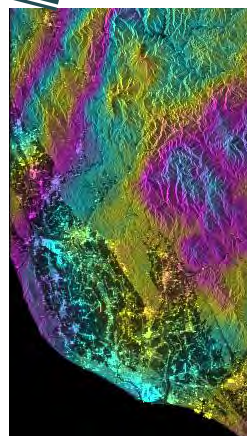
=



Along Track InSAR



Sub-band1



Sub-band2

【ALOS-2への期待】

広帯域化

(3mモード: **84MHz**)

によりSplittingの感度向上!?

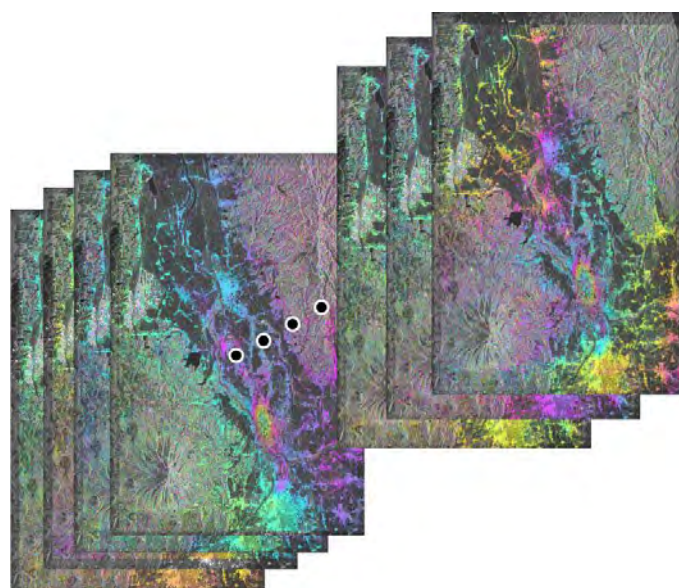
SAR時系列解析手法を適用した微小な地盤変動抽出の試み

～ 干渉解析手法の改良による誤差低減 ～

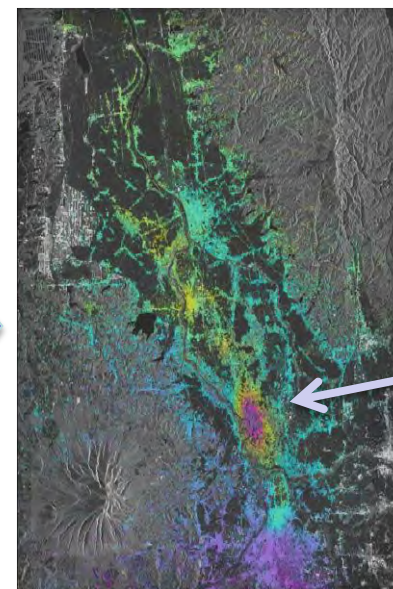
SAR時系列解析

同一地域を撮像した複数のSARデータを利用し、
年間数mm～cmの規模で進行する地盤変動の抽出を可能とする技術

※PS-InSAR法, SBAS法などがあり, 欧米などではその利用が急速に発達



PS-InSAR



2～3cm/年の
地盤沈下を抽出

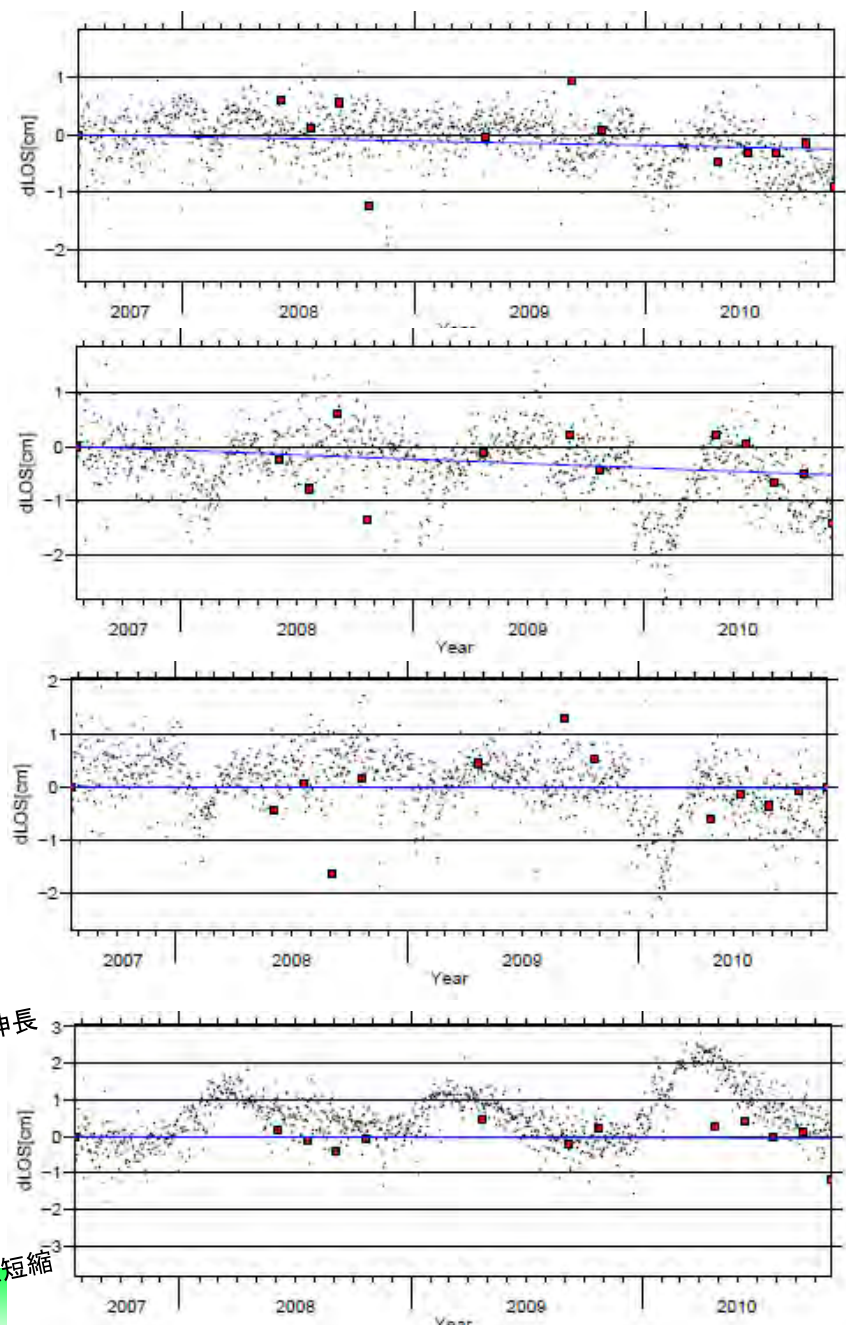
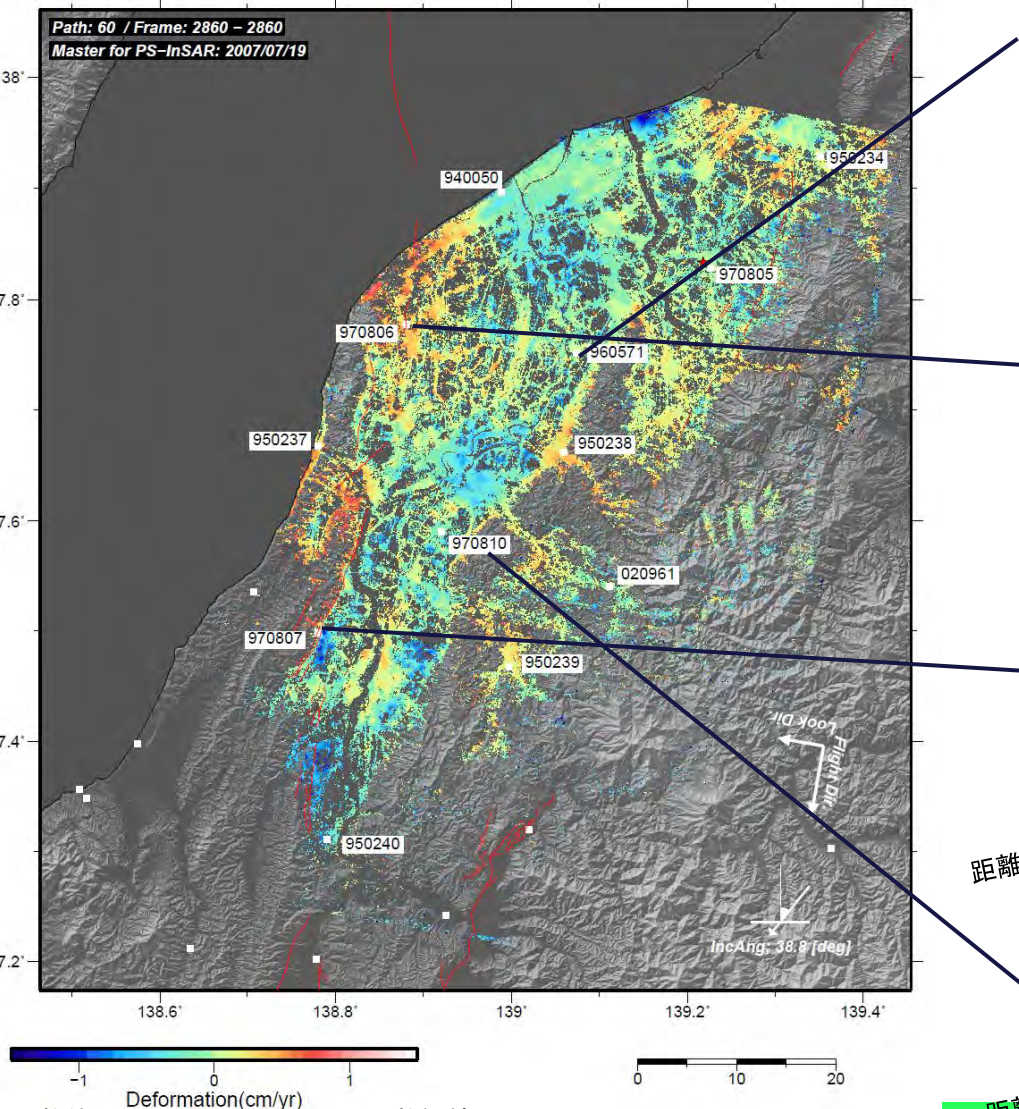
津軽平野の地盤沈下のPS-InSAR解析例

1地域の解析に, 数10シーン(通常20～50シーン)のデータが必要

歪集中帯(越後平野とその周辺)のPS-InSAR解析

GEONET 970805(水原固定)

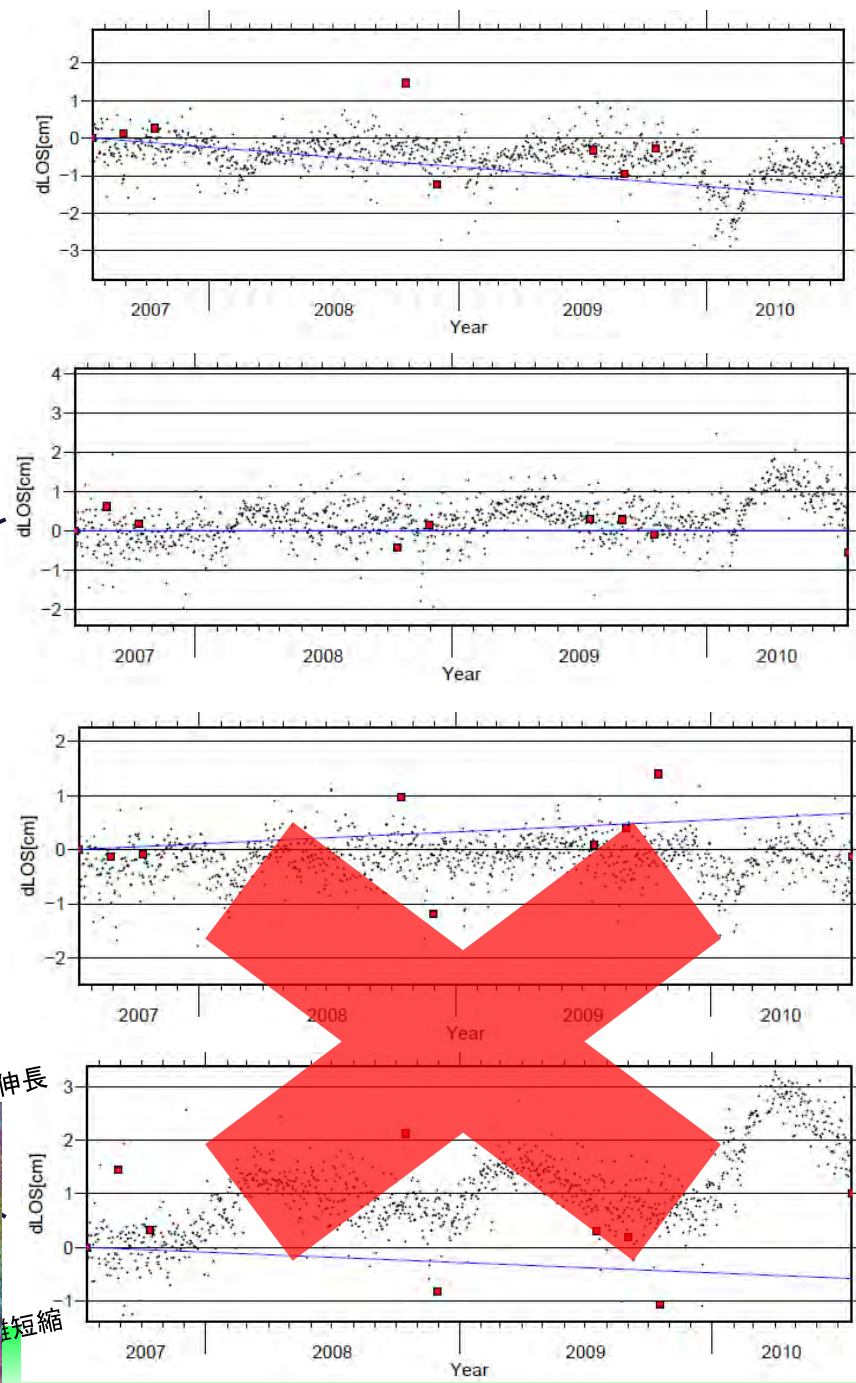
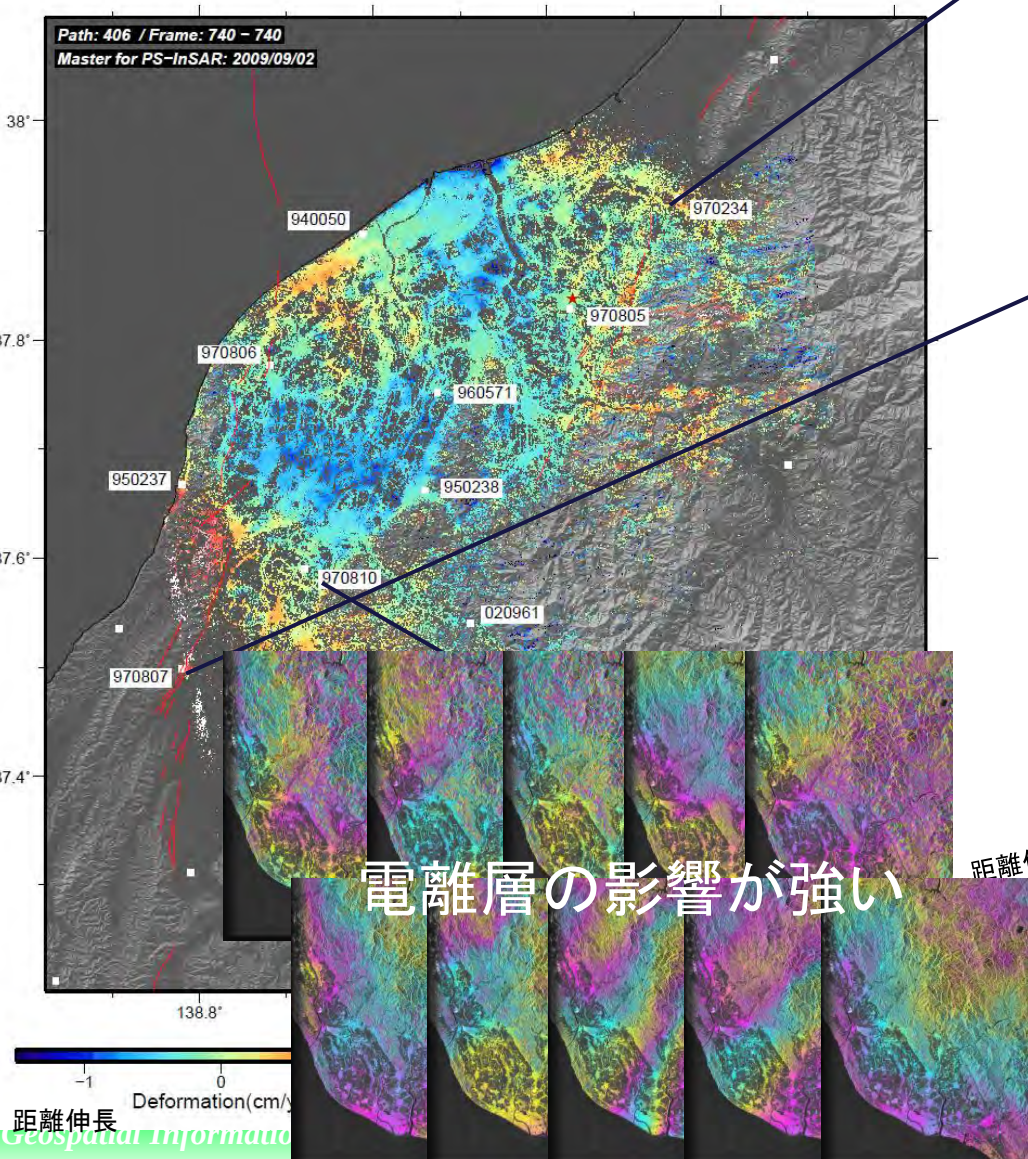
青線:PS-InSAR 変動レート
赤点:PS-InSAR 変動レート+非定常変動



GEONETと比較 P406 北行軌道

GEONET 970805(水原固定)

青線:PS-InSAR 変動レート
赤点:PS-InSAR 変動レート+非定常変動

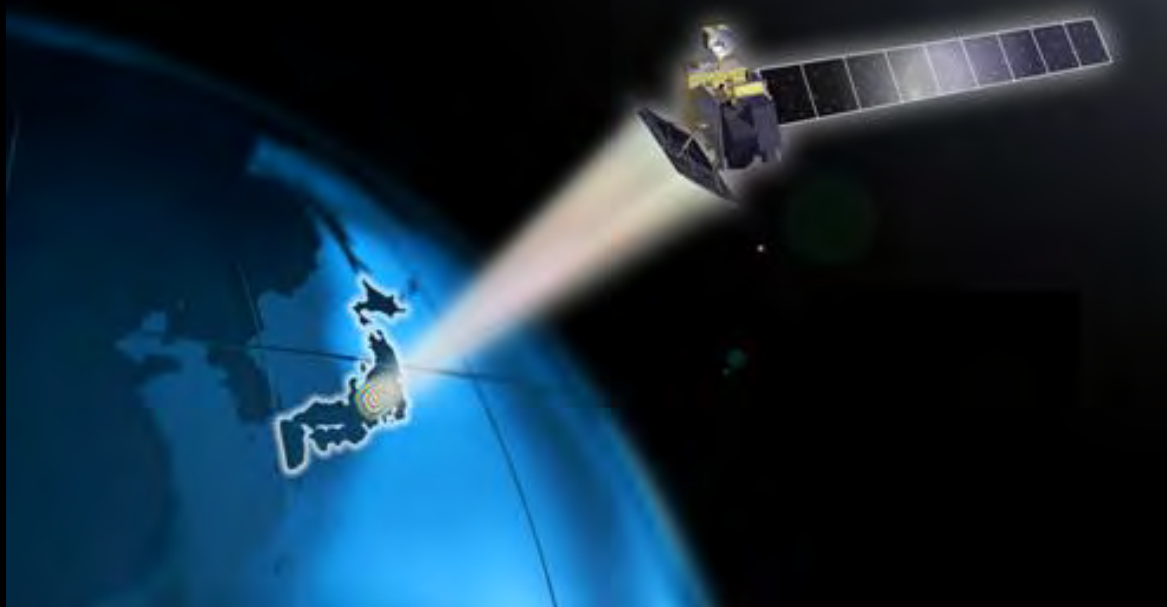


＝地震・火山観測におけるSAR＝

1. 内陸地震の解析におけるSAR観測 ～FarからNear-Fieldの観測へ～
 - ・2011年福島浜通りの地震を振り返る
 - 破壊の複雑性(位置, 破壊様式の詳細把握etc)
 - 中規模の内陸地震像をより鮮明に
 - ・内陸地震観測における課題
 - 多くの情報量を的確に地震学・火山学的解析に組み込む必要性
 - 巨大内陸地震(M8級)への適応力強化
2. 地震・火山観測の高度化に向けて
 - ・大気(水蒸気)起因の誤差への取り組み
 - 観測時刻変更, 数値気象モデルの高度化に伴う誤差低減効果の検証
 - ・電離層擾乱起因の誤差への取り組み
 - 84MHzへの広帯域化によるSplitting-Spectrum法の効果の検証
 - ・時系列解析への取り組み
 - 電離層対策は必要

「だいち」 5年間お疲れ様でした

日本の国土に適合したLバンド帯の
SAR衛星技術は日本が世界最先端



引き続きALOS-2にも大きな期待を寄せています.