

◆ 干渉SAR時系列解析における
計測点密度向上に関する幾つかの試み

小林 知勝

国土地理院

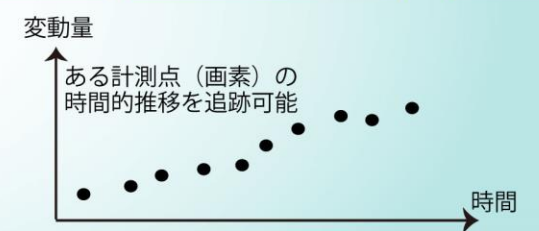
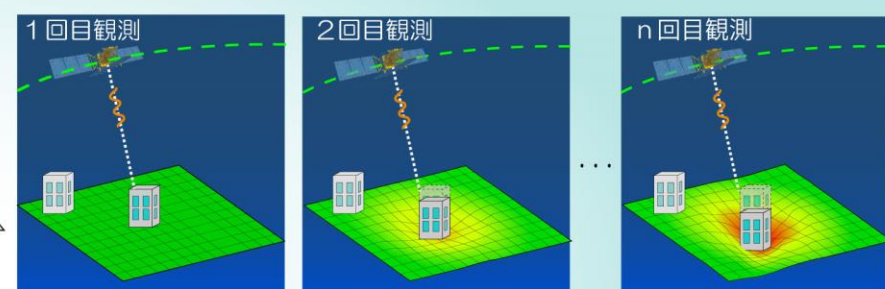
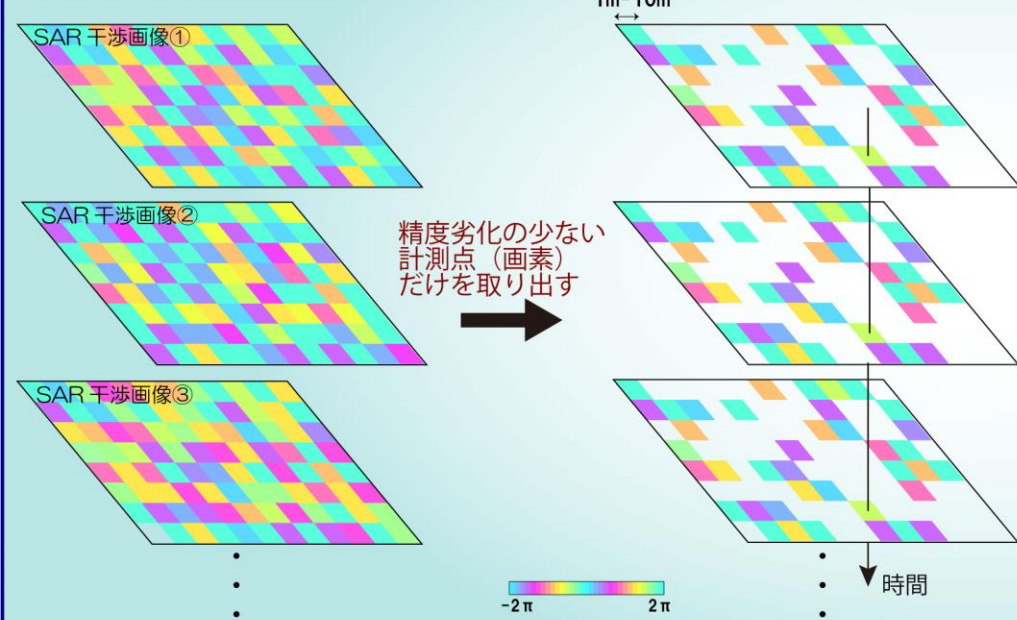
謝辞：本研究で利用したデータは、
JSPS科研費25350494の助成を受けたものです。

Dec. 3, 2015@京大防災研一般研究集会

干渉 SAR 時系列解析

- ① 面的な計測
- ② mm オーダーの計測精度
- ③ 時間推移の把握

(例：PSI 法)



良質の計測点 (画素) だけ抽出
 ➡ 高い空間解像度を維持したまま
 高い計測精度で変動を検出可能

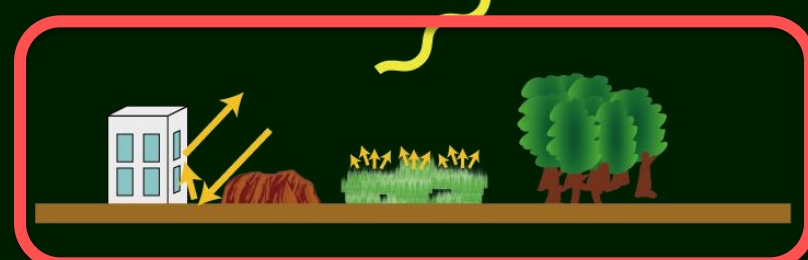
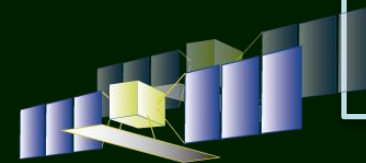
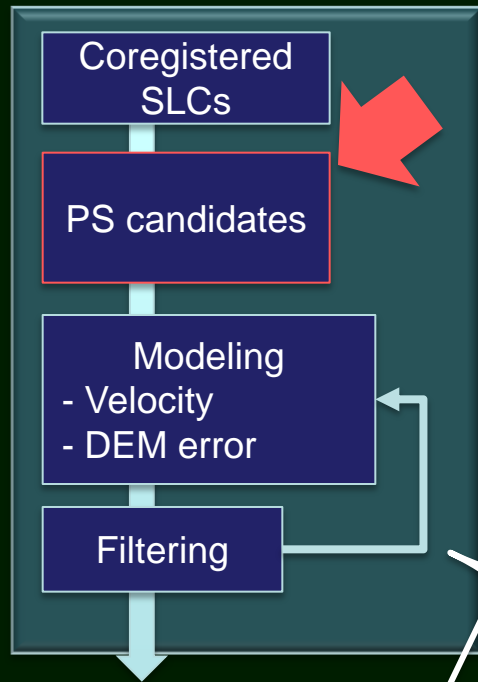
計測に適した高品質な点だけを利用

干渉SARの**多点観測**の長所を生かしつつ、
高い計測精度で測量が可能！！

低減しようとするノイズ

$$\phi = \phi_{def} + \phi_{topo} + \phi_{flat} + \phi_n$$

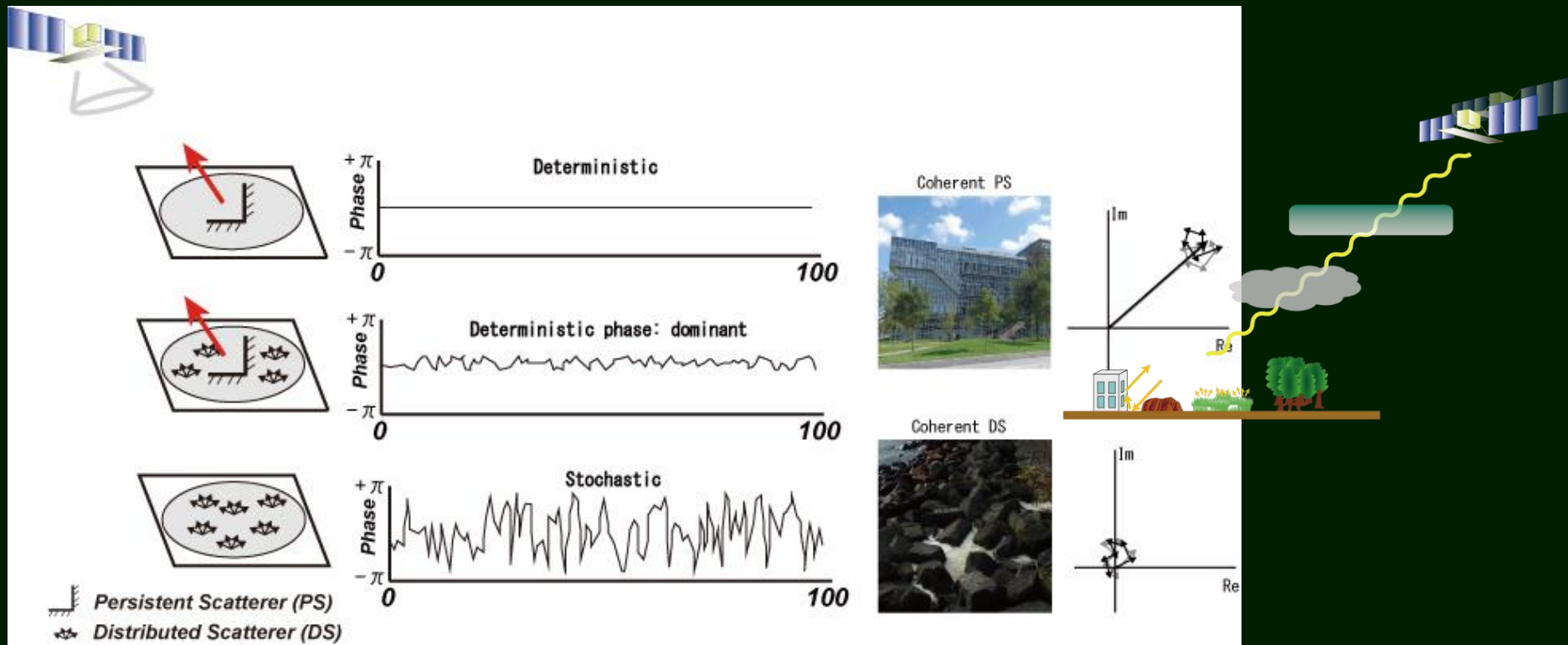
$$\phi_n = \phi_{orb_err} + \phi_{atm} + \phi'_n$$



$$\phi_{atm} = \phi_{ion} + \phi_{trop}$$

$$\phi'_n = \phi_{dec} + \phi_{noise}$$

位相計測の安定性

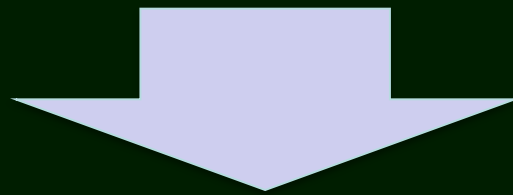


■PS点： 建物のようなPoint Scattererからの信号は、周囲の散乱体からの信号より強い。そのため、Point Scattererを含む画素は位相誤差が小さくなる。Point Scattererが建物のように不動だと、時間的に位相は安定するためPersistent Scatterer (PS点)となり得る。

■DS点： SARを構成する信号の大多数は、多数の散乱体からの総体信号である (Distributed Scatterers (DSs))。観測位相は確率的に支配される性質を持つ。Complex Circular Gaussian (Hanssen, 2001: 4章)

日本の地殻変動観測への適用における問題点

- 日本の国土は樹木に覆われ裸地が少ないため、精度の高い計測が担保される画素となる散乱体が取得しにくく、計測点の空間密度が大幅に劣化



解決策は・・・

1. 山間部に存在するPS点を、取りこぼしなく可能な限り多く抽出すること
2. 画像の多数を占めるDS点を何らかの方法でPS点と同等の水準で扱えるようにする必要

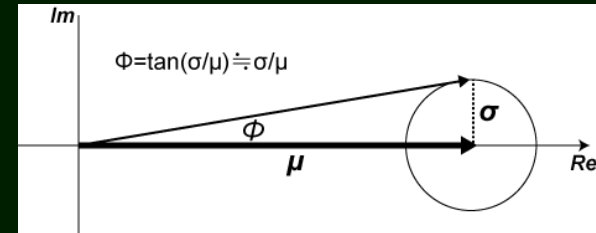
■ 複数画像

分散指標 (Amplitude Dispersion)

- 精度がよい
- × 一般的に20枚以上必要

$$D_A = \sigma_A / \mu_A$$

変動係数

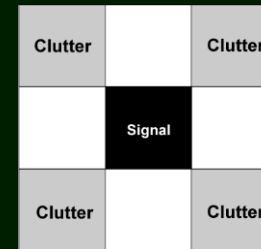


■ 単一画像

1. SCR (signal-to-clutter ratio)

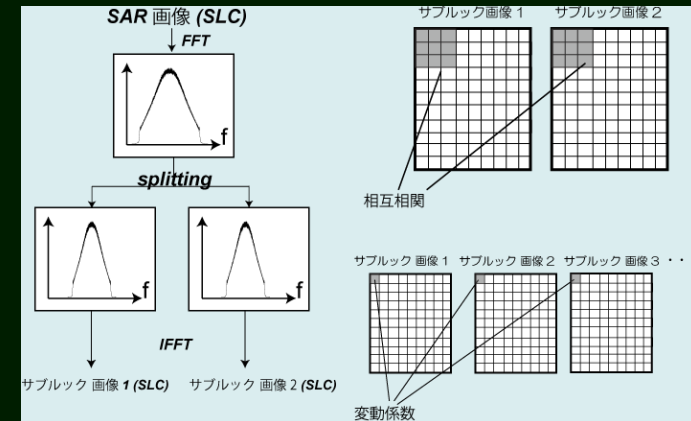
- 簡便, 1枚で計算可能
- × 点状散乱体にのみ適用可

$$SCR = \frac{s^2}{c^2}$$



2. サブルック化処理 (Coherent Scatterer (CS)の利用)

散乱特性が安定している点を含む画素はノイズが少なく、SLC画像のレンジ/アジマス成分の周波数領域を分割(サブブロック化)した場合でも、スペクトルが安定し、その分散性が小さい。このスペクトル特性の安定した点はしばしば **Coherent Scatterer (CS)** と呼ばれる。CS点は、その安定性から、**時間的にも位相が安定している**と考えられ、時系列解析においてPS候補点として扱うことが可能。



2.1 : サブルック画像間の分散指標

2.2 : サブルック画像間の振幅相関

例) 海上の船舶検出

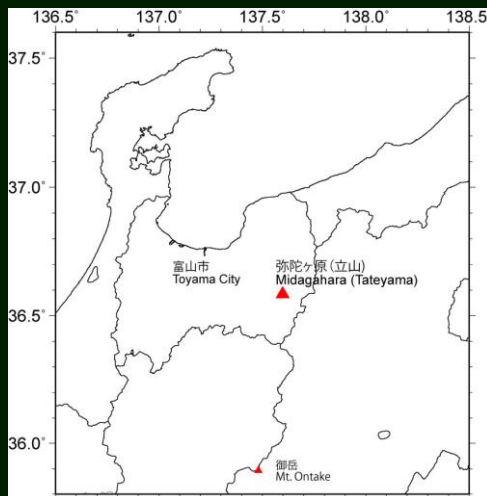
- 1枚で計算可能
- × 一般的に空間解像度劣化

地 獄 谷

- 一連の水蒸気爆発によって生じた爆裂火口 (中野・伊藤, 1998)
- 比較的規模の大きな水蒸気爆発: 4 回 (1万年以降)
- 1836年に小規模な水蒸気爆発「・・・地獄谷近邊煙二テ闇ク相成・・・」 (中野・伊藤 (1998))
- 直近では, 1998-2006年の間に地獄谷の西側で小規模噴火か?

活動の活発化

- 2010年に鍛冶屋地獄付近で硫黄の燃焼・流出
- M5.4(2011/11/5)の地震が発生するなど、周辺の地震活動の活発化
- 噴気の拡大・活発化や温度上昇〔2012年6月以降の観測〕 (気象庁, 2013)

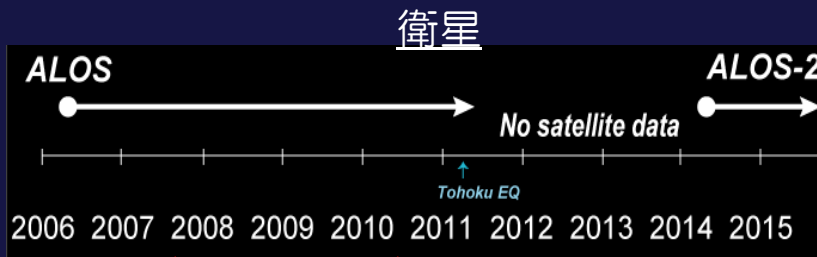


■ データ

期間: 2007 - 2010 (ALOS)

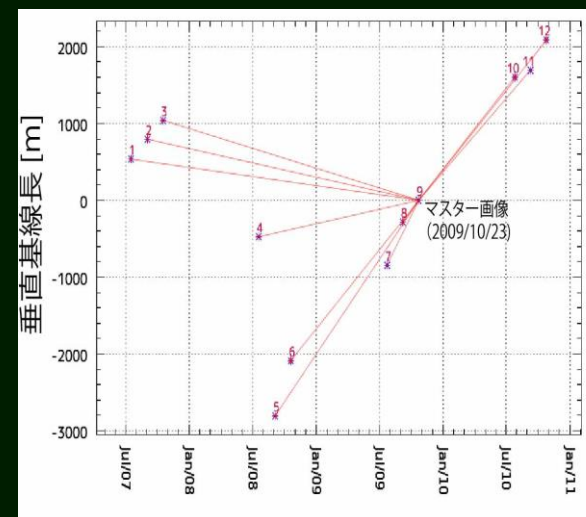
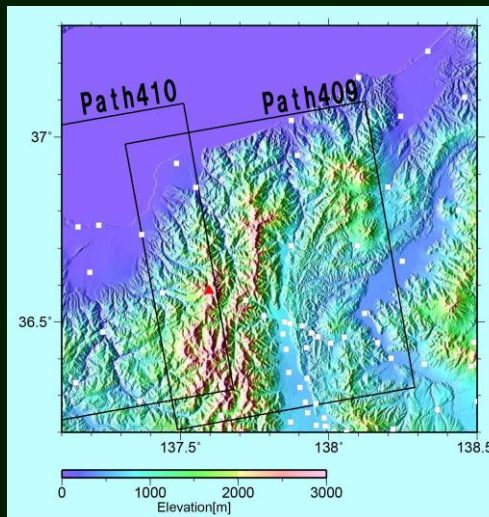
- 画像数: 12

- 2007/7/18 - 2010/10/26 (1196日)

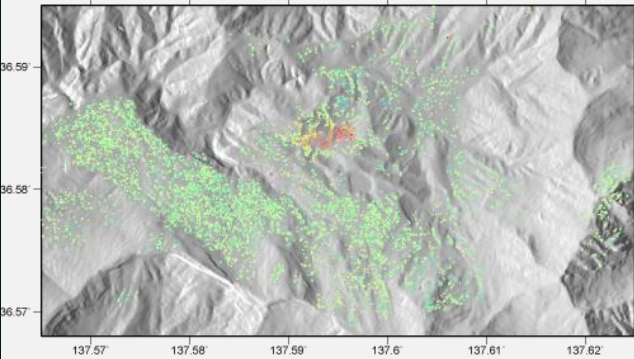


本研究のメインターゲット

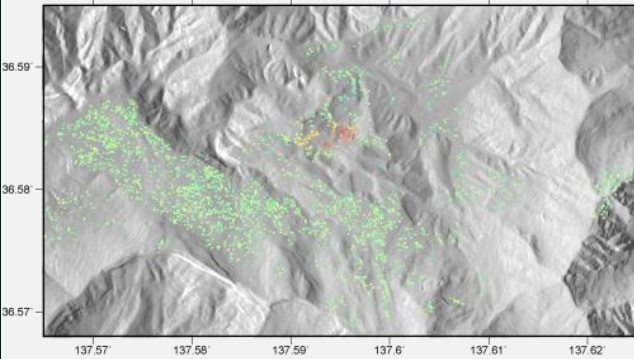
Date	Interval [day]	Bp [m]
2007/07/18	828	535
2007/09/02	782	794
2007/10/18	736	1039
2008/07/20	460	-474
2008/09/04	414	-2806
2008/10/20	368	-2083
2009/07/23	92	-846
2009/09/07	46	-284
2009/10/23	0	0
2010/07/26	276	1602
2010/09/10	322	1696
2010/10/26	368	2086



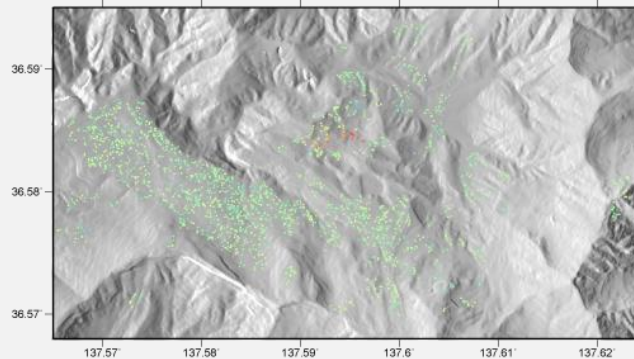
ALL



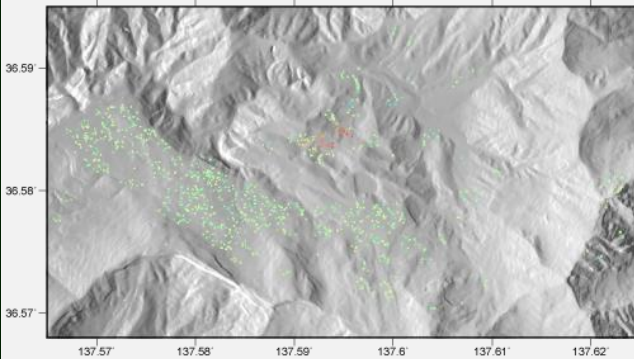
Amplitude Dispersion



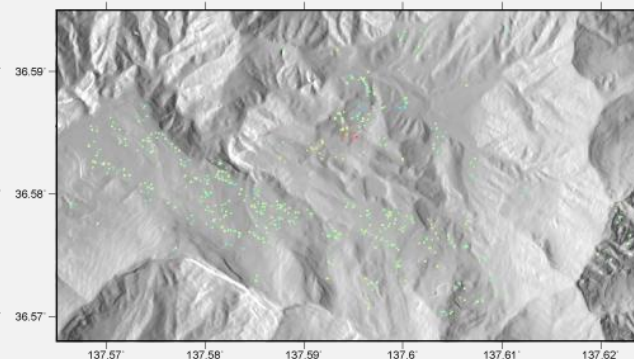
SCR



Sublook Amplitude Dispersion (SAD)



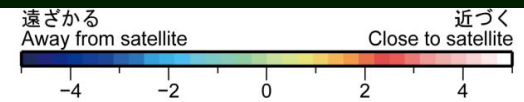
Sublook Amplitude Correlation (SAC)



合計	7601
分散指標	5018
SCR	3126 (1116)
サブブロック (分散指標)	2256 (884)
サブブロック (振幅相関)	1924 (658)

() 内は、分散指標で得られたPS点と同じPS点の数

標準的に用いられる分散指標の場合の**1.5倍**のPS点を抽出できた。



衛星-地表視線方向の変位速度 [cm/yr]
Displacement rate between satellite and ground [cm/yr]




日本の地殻変動観測への適用における問題点

- 日本の国土は樹木に覆われ裸地が少ないため、精度の高い計測が担保されるPS点となる散乱体が取得しにくく、計測点の空間密度が大幅に劣化
- 山間部に多く分布する活断層や火山を対象とした監視に必ずしも適さない

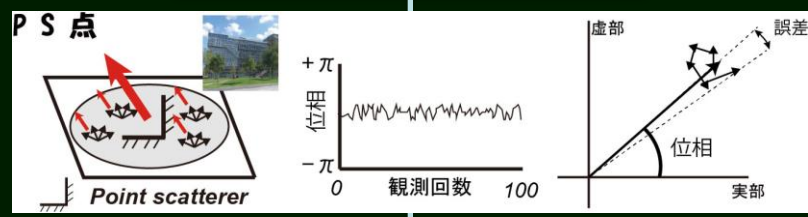


画像の多数を占めるDS点を何らかの方法でPS点と同等の水準で扱えるようにする必要

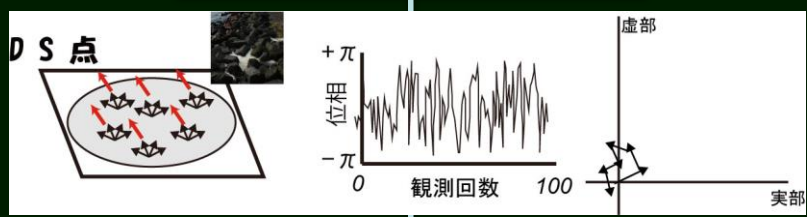
 **Phase Linking法**と呼ばれる手法でDS点をPS点と同等の精度を持つ位相に変換することで、山間部における計測点密度を大幅に向上

時系列解析フロー概観 - SqueeSAR -

PS (Persistent Scatterer)



DS (Distributed Scatterers)



PSI
PS候補点の抽出 (AD method etc..)

PS: $\Phi_1 - \Phi_5 = \Phi_{12} + \Phi_{23} + \Phi_{34} + \Phi_{45}$

SqueeSAR-like

SBAS, DS-based MTI

空間適応型フィルタ

マルチルック (Box型処理)

DS: $\Phi_1 - \Phi_5 \neq \Phi_{12} + \Phi_{23} + \Phi_{34} + \Phi_{45}$

パラメータ推定
変動速度
DEM補正量
対流圏誤差 etc.

SHP (Statistically Homogeneous Pixels)

位相連続処理

位相連続化前
 $-2\pi \sim 2\pi$

高コヒーレンスの画素の選択・抽出

位相最適化
[Phase Linking]

位相最適化
[SVD (特異値分解)]

	PSI	SBAS, DS-based MTI
位相精度	◎	△ 以下の操作に影響を受ける - 位相連続化 - 干渉ペアの選択 - ルック/フィルタリング処理
空間密度	×	◎

パラメータ推定
変動速度 etc.

Phase Linking (Guarnieri et al., 2008)

最適な位相は確率密度関数を最大にする位相

複素円周正規分布の確率密度関数

$$P(y|\phi) \propto \prod_{P \in \Omega} \exp(-y^H \Gamma^{-1} y)$$



最尤法

$$\begin{aligned} \widehat{\phi}_1, \dots, \widehat{\phi}_N &= \operatorname{argmax}_{\xi} (\xi^H (\Gamma^{-1} \circ I_{\Omega}) \xi) \\ \xi^H &= [1, \exp(i\phi_1), \dots, \exp(i\phi_{N-1})] \\ I_{\Omega} &= (\gamma^{i\Delta\phi}): \text{Interferograms} \end{aligned}$$

Γ : 複素コヒーレンス行列

利点

- 位相連続化前に最適な位相を見積もることが可能
- 全ての 干渉画像データを推定に用いる

一旦位相が最適化されれば、その位相は、

- 1) PS点として扱うことが可能
- 2) 従来のPSI解析に取り込んで利用可能.

Phase Linking : コヒーレンスを基に位相の時系列を最適化する手法



コヒーレンスを正確に求める必要がある



しかし、標準的なマルチルック (Boxcar型マルチルッキング) では、種々の散乱体で構成される画素をまとめてマルチルックしているので、正確なコヒーレンスは求められない。

※コヒーレンス計算は、エルゴード性 (空間的な均質性) が保証された場合のみ成り立つ



同じ散乱体で構成される画素をマルチルックすることで、正確なコヒーレンスを求める必要性

How?

2標本に有意な差があるか否かを判定する検定手法を用いることで、振幅情報のみから、周囲の同質の画素を抽出する。



Statistically Homogeneous Pixels (SHPs), Brother/Cousin Pixels

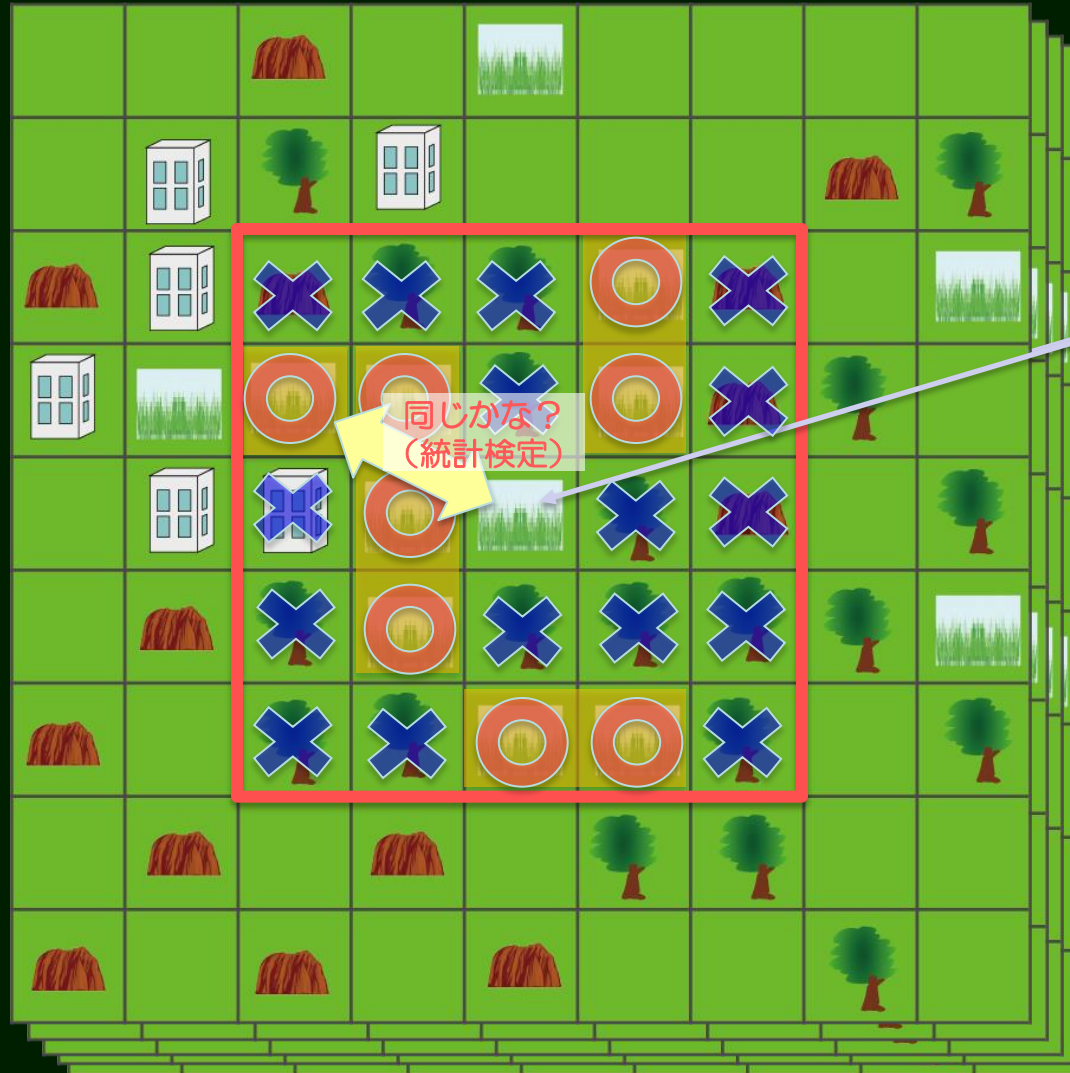
ノンパラメトリック
検定 (KS検定等)
からSHPを検出



統計的に有意な差が
ないと判定された画
素を用いてコヒー
レンスを計算



得られた (複素) コ
ヒーレンス行列を用
いて, Phase
Linking法により位
相を最適化



Target pixel

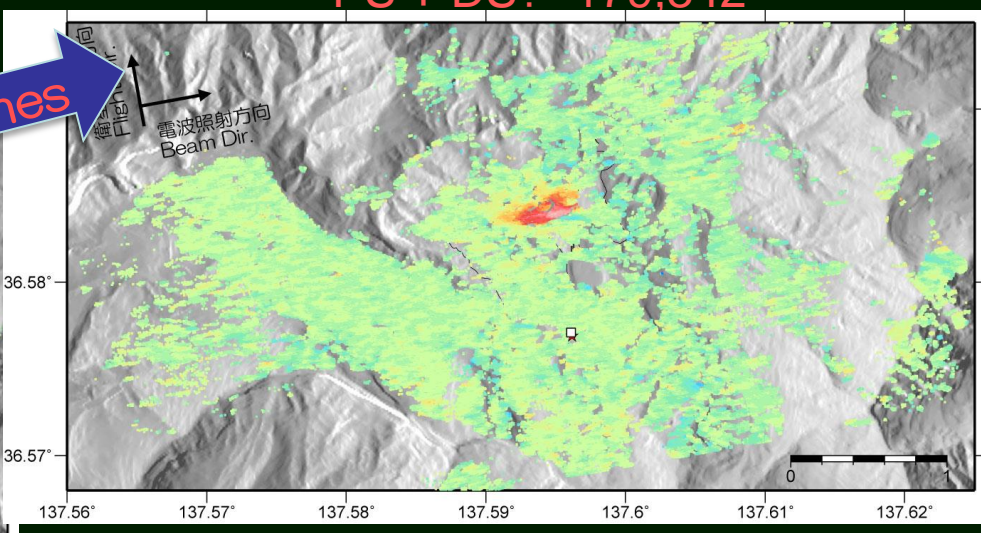
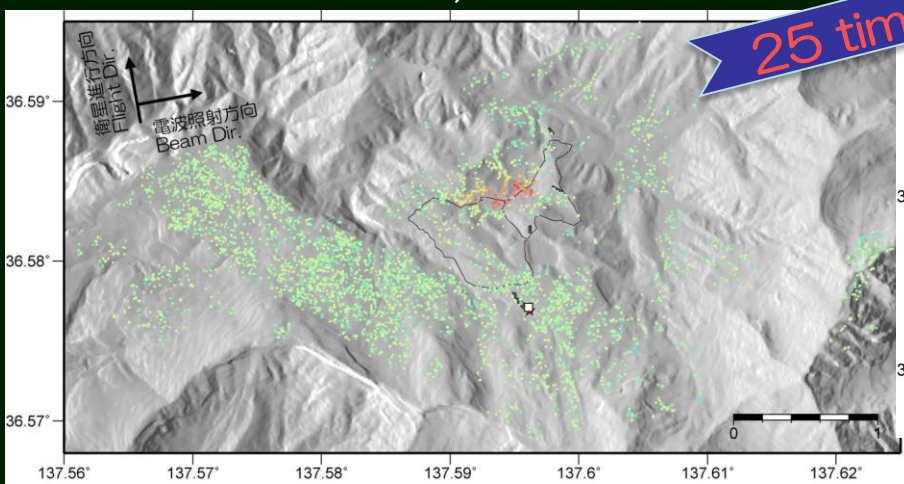
実データへの適用試験

PSI v.s. Phase Linking (SqueeSAR)

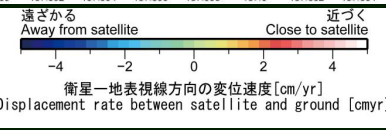
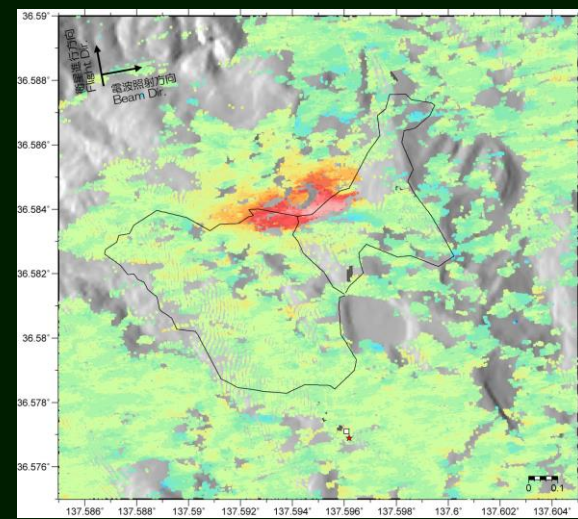
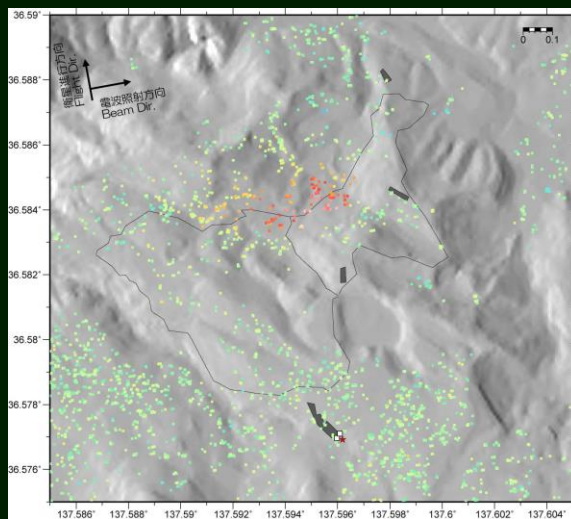
PS + DS: 179,842

PS: 7,094

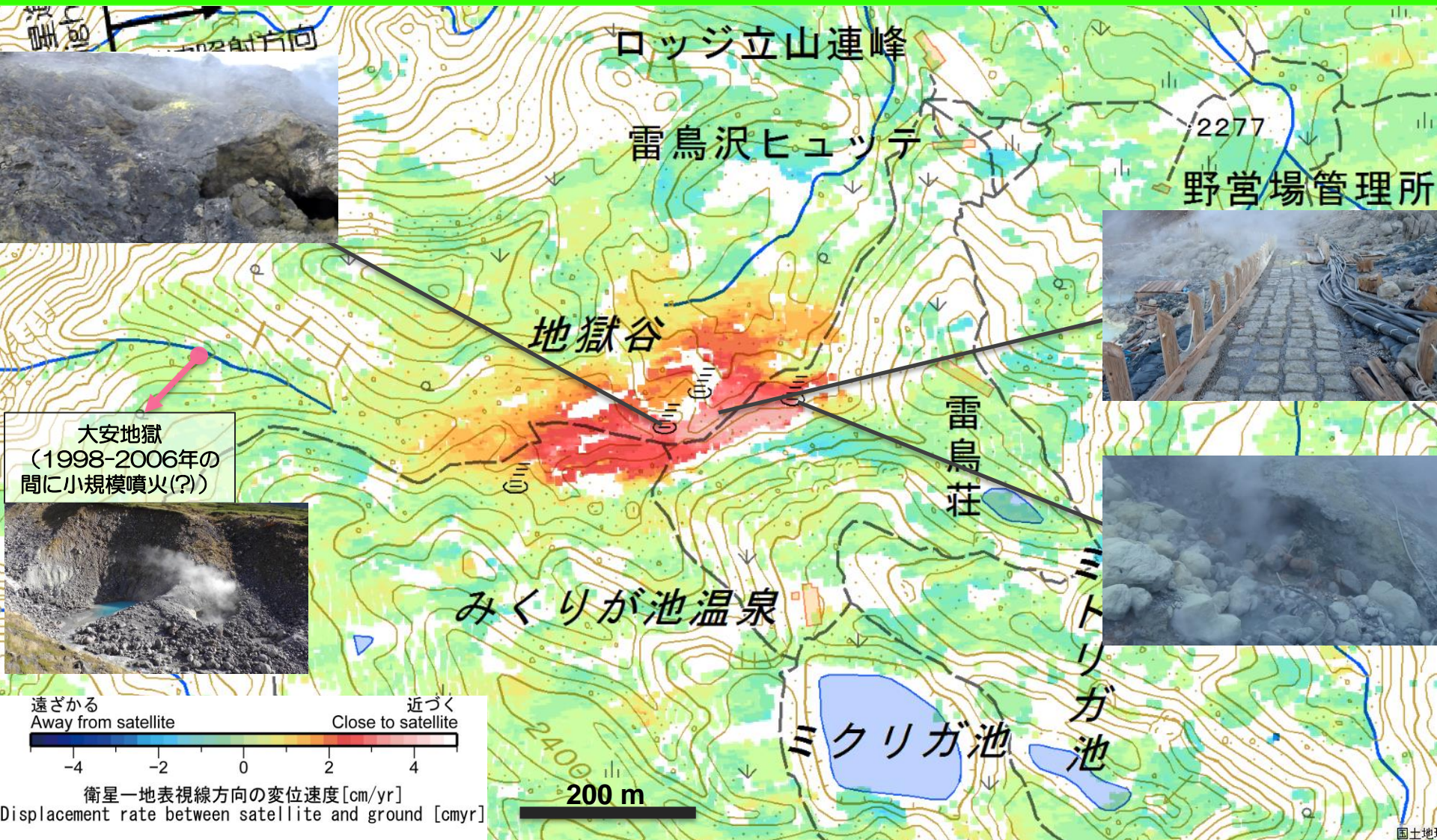
25 times



地獄谷 (拡大図)



地獄谷およびその周辺の地殻変動 on 地理院地図



- 変動の空間的広がり、地熱活動域と調和的
- 最大4cm/yr
- 1998-2006年に発生したとされる小規模噴火の噴火口付近には顕著な変動は見られない

干渉SAR時系列解析の計測点密度向上を目的として、1) 単一画像を用いたPS候補点抽出処理、2) DS点の位相最適化処理を試行した。

1. SCR法及びサブブロック化によるCS点抽出等の複数のPS候補点抽出処理を山間部のデータに適用した。PS点を増やすことができたものの（本試行では1.5倍）大きな改善には至らなかった。

2. 微小な地殻変動観測には不向きなDS点を、PS点と同等の位相精度に変換する技術開発を行った。

2.1. シミュレーションデータを用いたテストにおいて、Phase Linking法により、真の位相がよく再現されることが確認できた。

2.2. 実データへの適用試験において、山間部でも、標準的なPSI解析で得られるPS点の約20倍の計測点を取得することに成功した。本技術の利用により、山間部における火山や活断層周辺で進行する微小な地殻変動観測の水準を、飛躍的に向上させることが期待される。