

地震・火山観測に有効な SAR観測

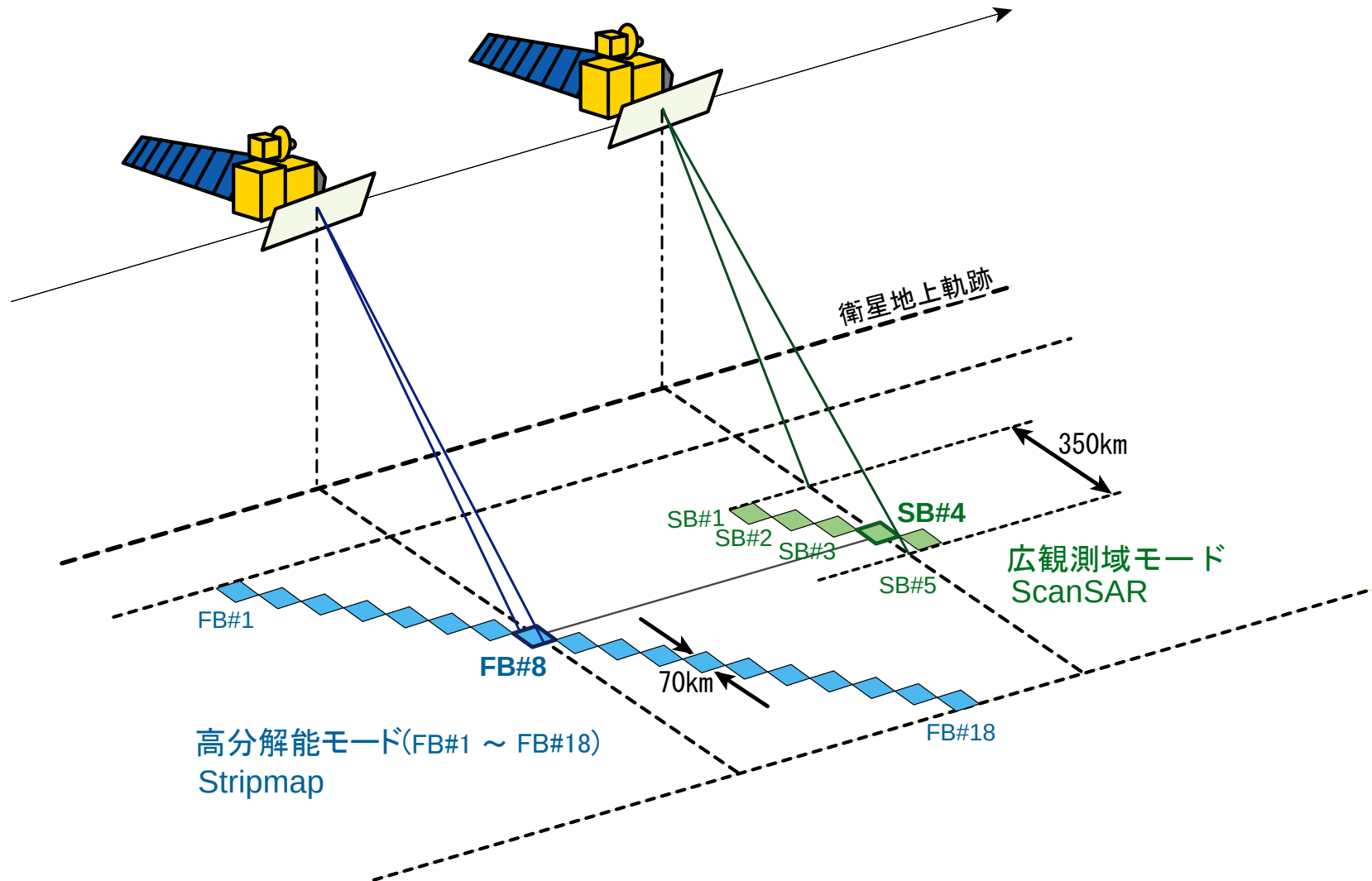
1. なくてはならない衛星SAR
2. 利用実証から実利用へ
3. ALOS-2の理想像
観測モード, 軌道情報精度他

国土地理院

飛田 幹男, 小林知勝, 雨貝知美, 鈴木啓, 森下遊

広域を一度に観測可能なScanSAR

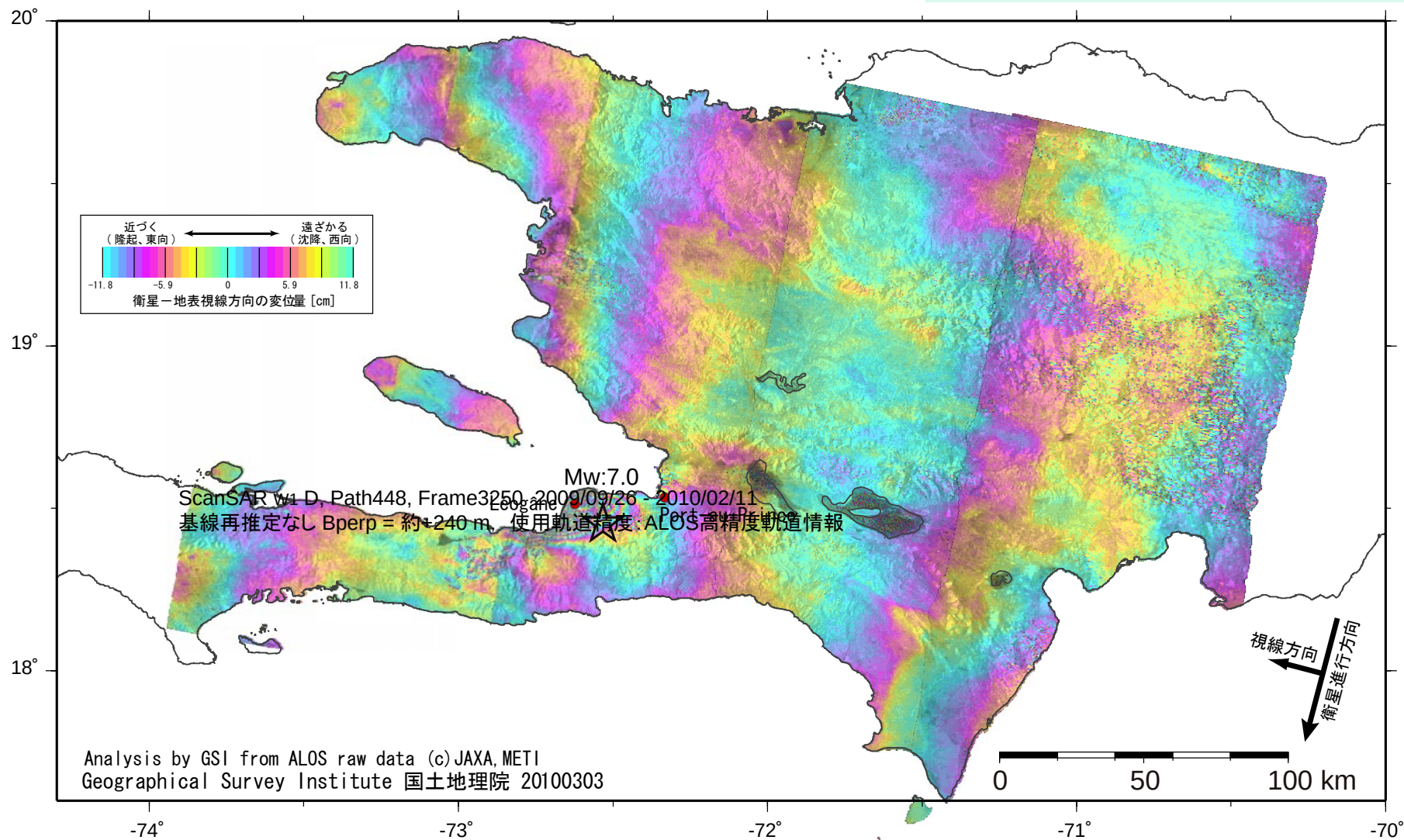
観測幅 70kmから350kmに



2010/1/12ハイチの地震:

PALSAR ScanSAR—ScanSAR干涉解析結果(暫定)

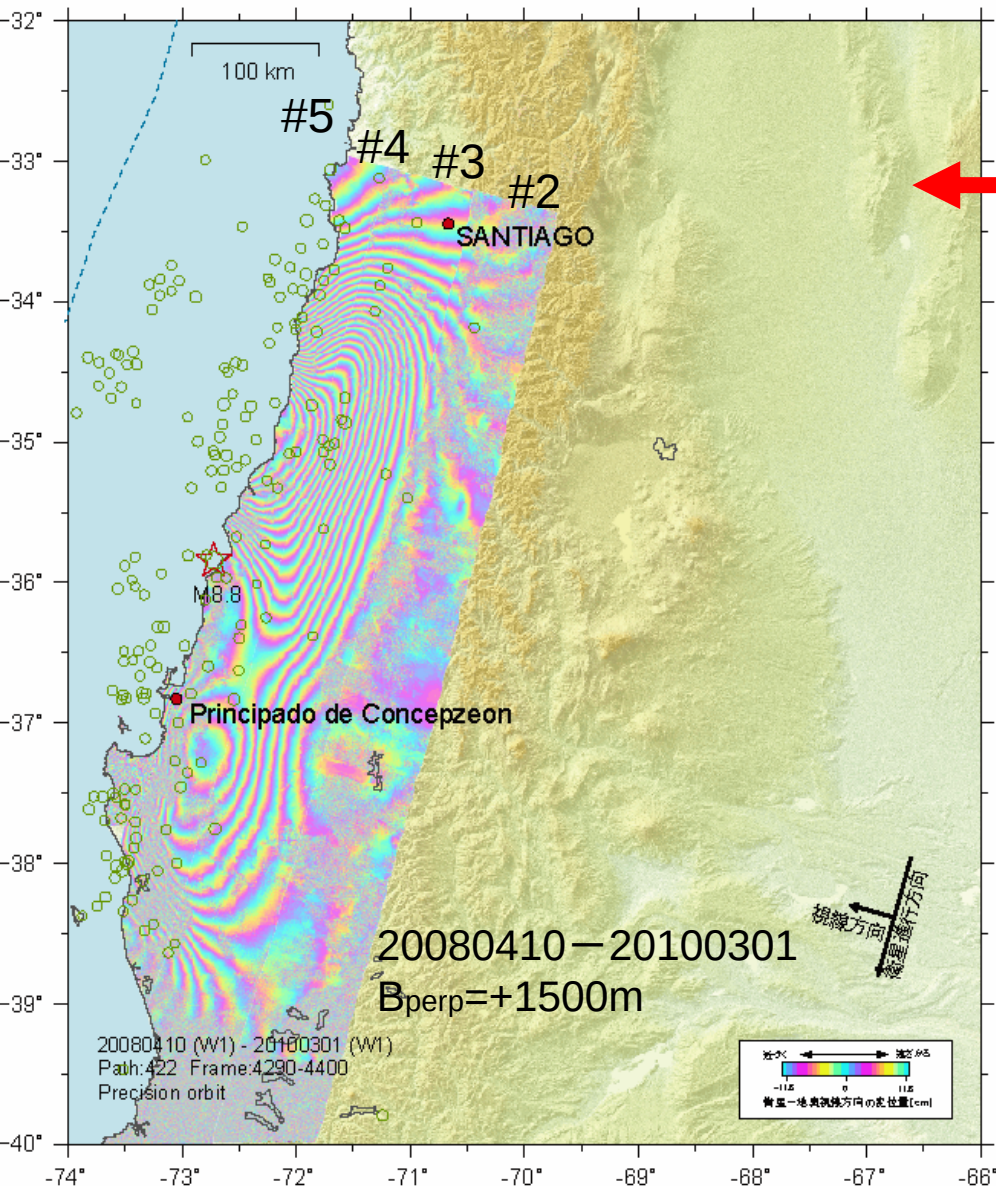
GSISARも2010年3月に対応



2010年2月27日 (M8.8) チリの地震: ScanSAR

2010年2月27日にチリで発生した地震に伴う海岸沿いのALOS FBS-ScanSAR干渉画像 (暫定)

ALOS ScanSAR (W1)-ScanSAR (W1) Interferogram of 2010-02-27 M8.8 Chile Earthquake



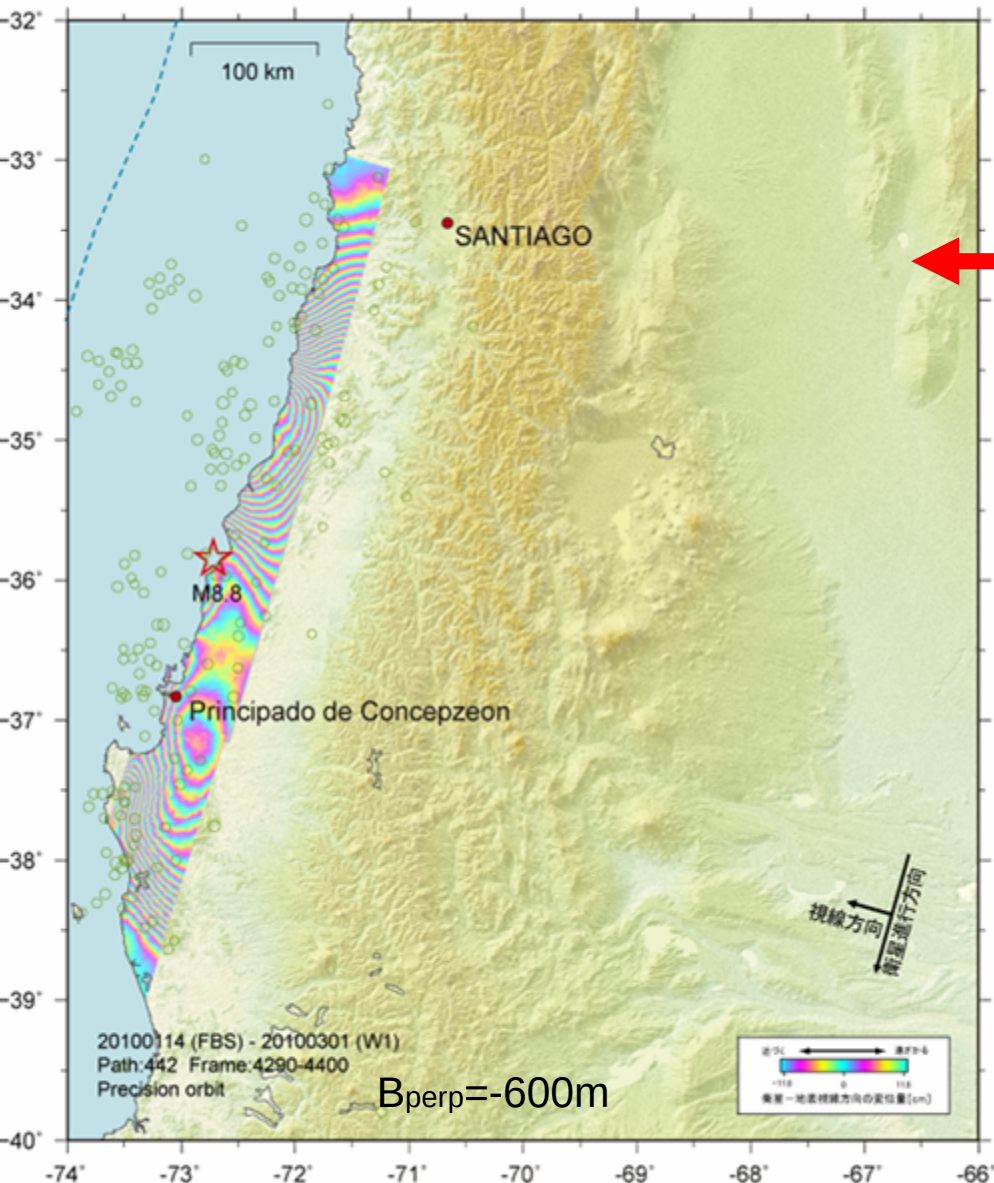
SAR干渉ペア

1. FB – FB
2. ScanSAR – ScanSAR
3. ScanSAR - FB



2010年2月27日 (M8.8) チリの地震: ScanSAR

2010年2月27日にチリで発生した地震に伴う海岸沿いのALOS FBS-ScanSAR干渉画像 (暫定)
 ALOS Stripmap (FBS)-ScanSAR (W1) Interferogram of 2010-02-27 M8.8 Chile Earthquake



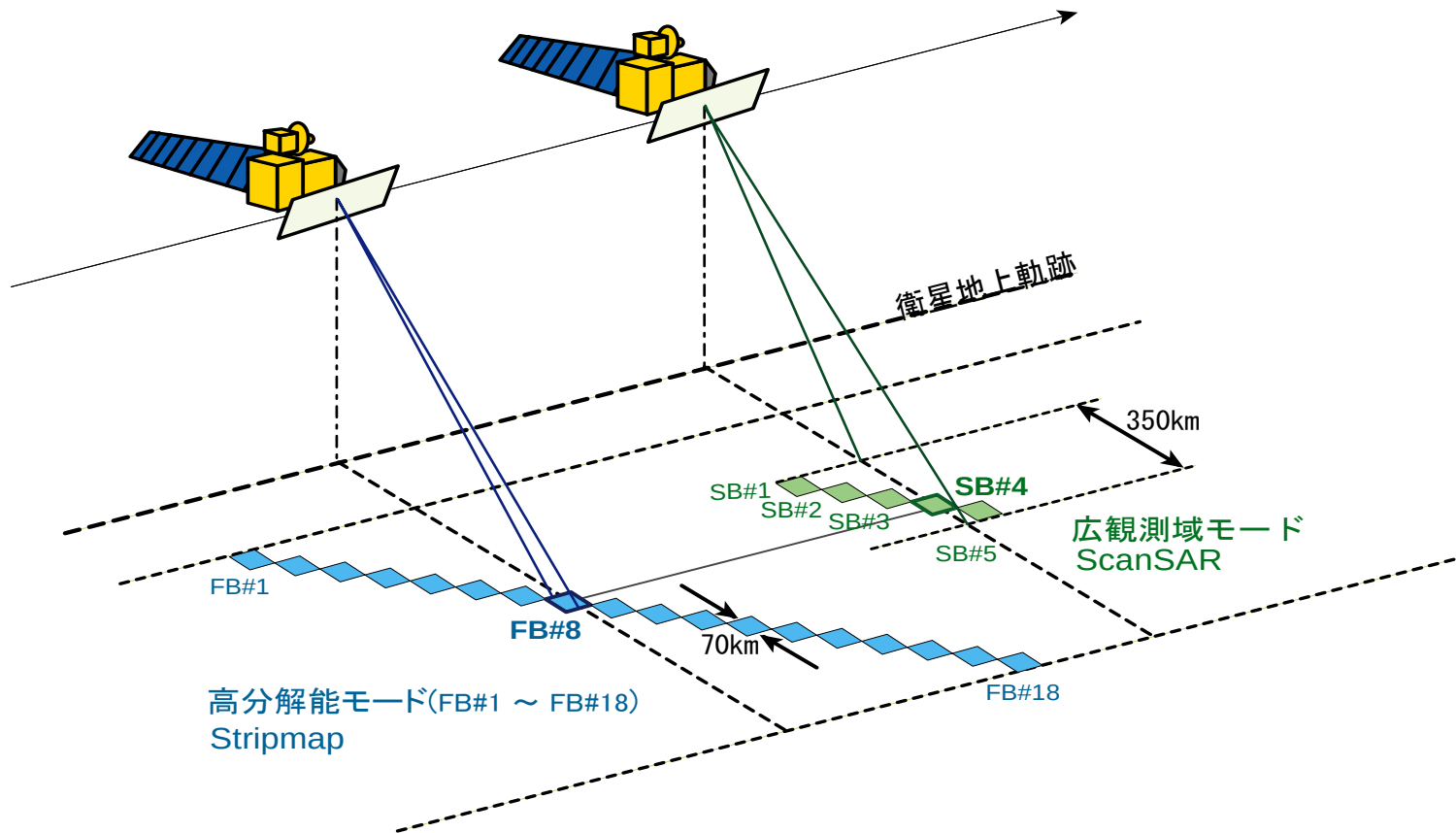
SAR干渉ペア

1. FB – FB
2. ScanSAR – ScanSAR
3. ScanSAR - FB

Filterなし

最大の地殻変動を記録した場所
 周辺で4本の位相の不連続を発見。⇒おつきあい地殻変動

広域を一度に観測可能なScanSAR



長所: 東西350kmを1回の観測で把握可能。より早く地殻変動の把握が可能。

短所: 分解能が劣る。⇒ピクセルオフセット法, 加色混合法が適用しにくい。

干渉性が劣る。大きな地殻変動に弱い。

課題: ScanSAR干渉解析を考慮した衛星運用が必要。

解析ソフトウェアの対応が必要。

解析ソフトウェアによって結果が異なる。地殻変動以外の残存縞。

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。

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)

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程 (3-1) 地震発生先行過程

イ. 先行現象の発生機構の解明

○兵庫県南部地震前後の地殻変動や地震活動の変化の原因を理解するために、地震活動やGPS,**SAR**等の測地データを新たな手法により再解析する。

3 新たな観測技術の開発

(2) 宇宙技術等の利用の高度化

○GPSや衛星搭載**SAR**等の宇宙技術は、地震及び火山活動を深く理解するとともにそれらの活動を的確に把握するための観測手段として重要な役割を果たしている。それらのデータを利用した解析技術の高度化を図ることにより、より高精度な測地手法の実現や様々な地震や火山活動をより高い精度で把握するリモートセンシング手法の実現を目指す。特に、「**だいち**」などによる衛星観測は、**国内国外の地震・火山現象の解明に有用なデータを提供しており、地球観測衛星が継続して打ち上げられることが極めて重要である**。

○「**だいち**」等による衛星**SAR干渉解析**による地殻変動把握技術の高度化のため、**永続散乱体干渉手法**、GPS等との統合解析手法、大気伝播誤差補正手法及び干渉データの位相連続化手法の拡張や改良を進める。

地震像、火山活動を把握するための基本ツールとなっている。

利用実証から実利用へ

利用実証: 時々良い成果が遅れて得られる.



実利用: 必要とされているタイミングで, 期待された情報が得られる.

特に重要な要件

1. 日本は高分解能3mモード中心

Critical Baselineが長く, 内陸地震に強い.

2. 世界はScanSARと高分解能10m中心

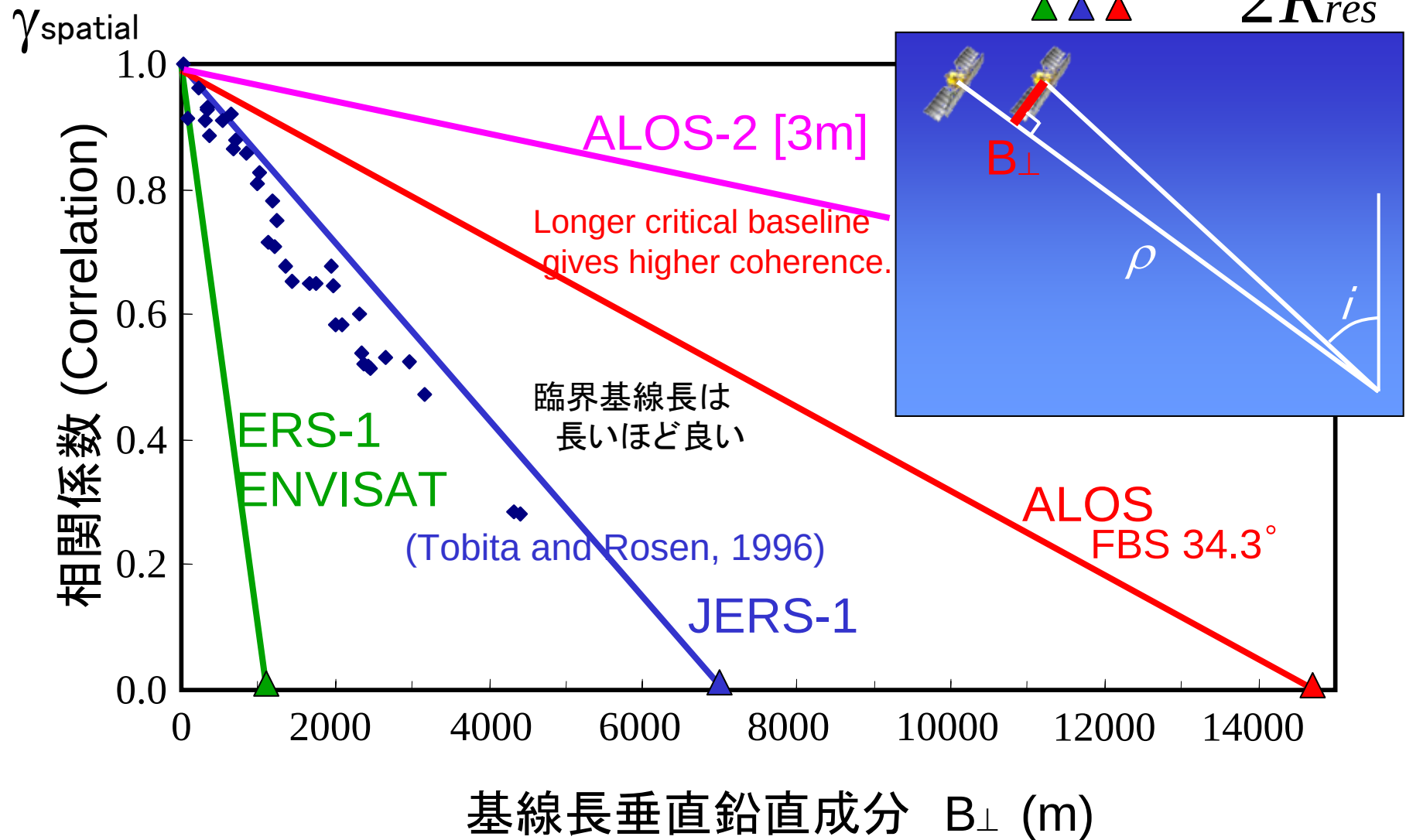
観測資源を節約しながら, AscとDescによる観測を実現.

3. 高精度軌道情報

軌道情報が高精度であればあるほど, SARデータの価値が高い.

Baseline Decorrelation

臨界基線長 Critical Baseline $B_{\perp c} = \frac{\lambda \rho \tan i}{2R_{res}}$



ALOS/ALOS-2 Critical Baselines for Basic look angles

look angle	Incid. angle	ALOS/ ALOS-2	Critical Baseline $B_{\perp c}$ (m)	Ideal $B_{\perp}$ (m) for steep slope
21.5	24.0	ALOS	7,400	< 370
		ALOS-2 [3m]	22,000	< 1,100
34.3	38.7	ALOS	15,000	< 760
		ALOS-2 [3m]	46,000	< 2,300
41.5	47.3	ALOS	23,000	< 1,200
		ALOS-2 [3m]	70,000	< 3,500

$$B_{\perp c} = \frac{\lambda \rho \tan i}{2R_{res}}$$

Ideal $B_{\perp} = B_{\perp c} \times 0.05$
 $\lambda \sim 0.236\text{m}, R_{res} \sim 5.35, 10.71\text{m}$

軌道制御範囲は直径
 300m以内(10m分解能)
 1km以内(3m分解能)

地殻変動の勾配(gradient)の臨界値 (Critical Gradient of Displacement)

$$\left(\frac{\partial \Delta \rho}{\partial \rho} \right)_c = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{R_{res}} (\text{m/m})$$

	ERS-1	Envisat	Radarsat	JERS-1	ALOS FBS	ALOS-2 3m分解能
地殻変動勾配臨界値 (mm/m)	2.9	3.0	5.7	11.7	22.1	~66

一般に、震源の**浅い地震**に伴う地殻変動は大きな地殻変動勾配を持つ。

また、大きな地殻変動は大きな地殻変動勾配を持つ。

これらは、被害の大きな地震である。

ALOS-2の3m分解能は、これら被害の大きな地震に伴う地殻変動のほぼ全体をとらえることができる。

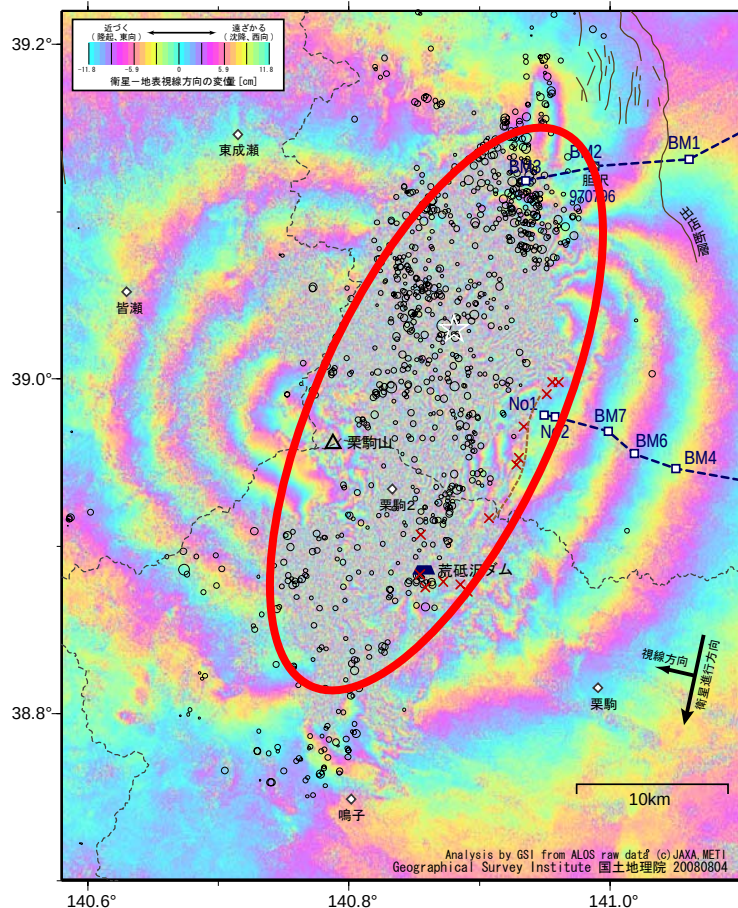
この議論には、基線長は関係ない。基線長が短くても関係ない。

高分解能[3m]の利点

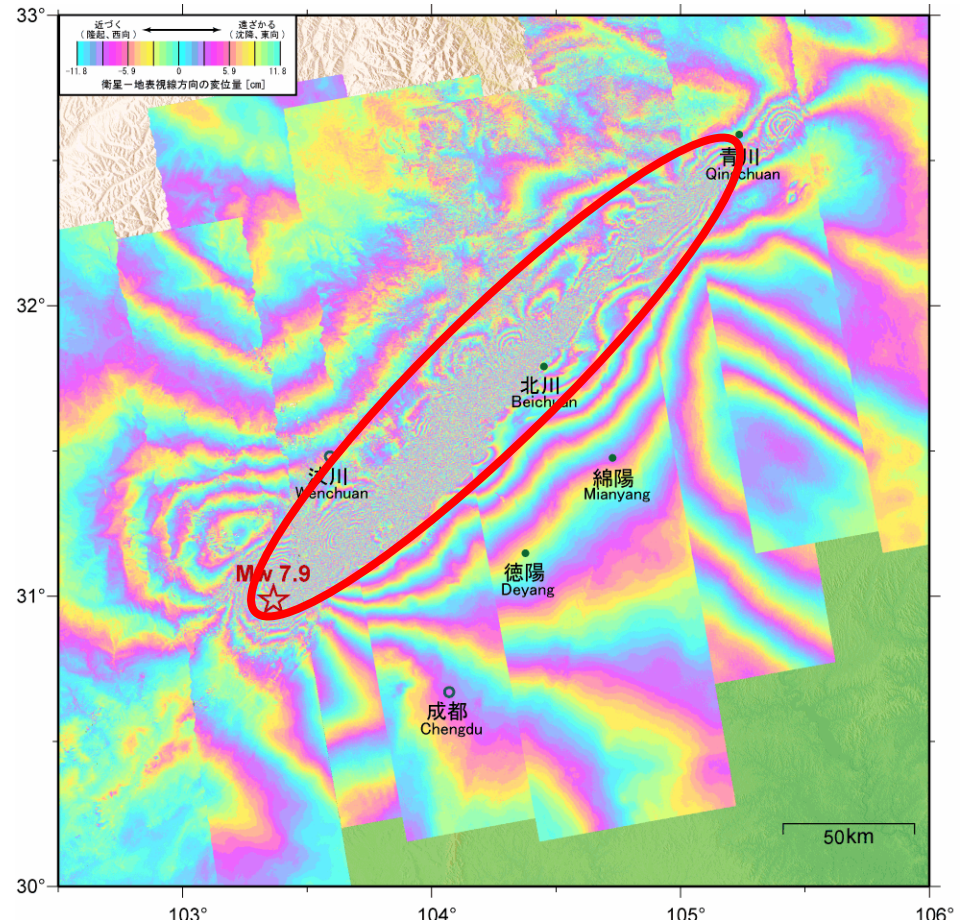
ALOSは非常に重要な知見を与えたが、最も重要な震源断層直上の地殻変動をほとんど捉えられなかった。

⇒ALOS-2高分解能[3m]はこれを改善可能(日本全土を観測すべき)

2008年岩手・宮城内陸地震



20080502四川省の地震

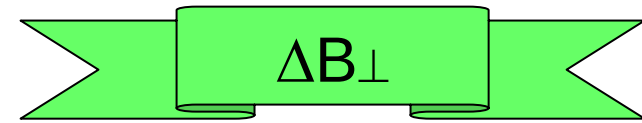


ALOS-2の理想像 軌道情報精度

- ALOS:
「ALOS高精度軌道情報」の仕様精度は
「1m以下」, 時間遅れは「3日後」
直後は, RARRによる150m(3σ)

- ALOS-2:
期待されるのは,
「**24時間**以内に精度**0.1m**の高精度軌道
情報が提供されること」
「**1時間**以内に精度**10m**」

ALOSでの干渉処理1



$$\Delta\phi = -\frac{2\Delta B_{\perp}}{\lambda}d\theta(\text{rad}) \text{ サイクル}$$

基線値誤差1mのときの残軌道縞

リーダファイルの軌道情報
を使った軌道縞の除去。
フルシーン。

JERS-1での残軌道縞

$$\Delta B_{\perp} = 100\text{m}$$

$$\Delta B_{//}(\text{bottom}) = 1\text{m}$$

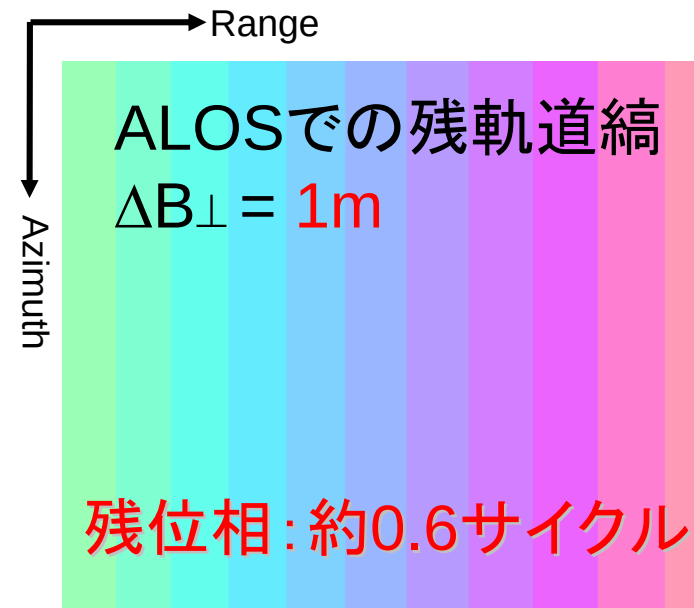
残位相: 横66サイクル
縦8.5サイクル

JERS-1での残軌道縞

$$\Delta B_{\perp} = 100\text{m}$$

$$\Delta B_{//}(\text{bottom}) = 0\text{m}$$

残位相: 66サイクル



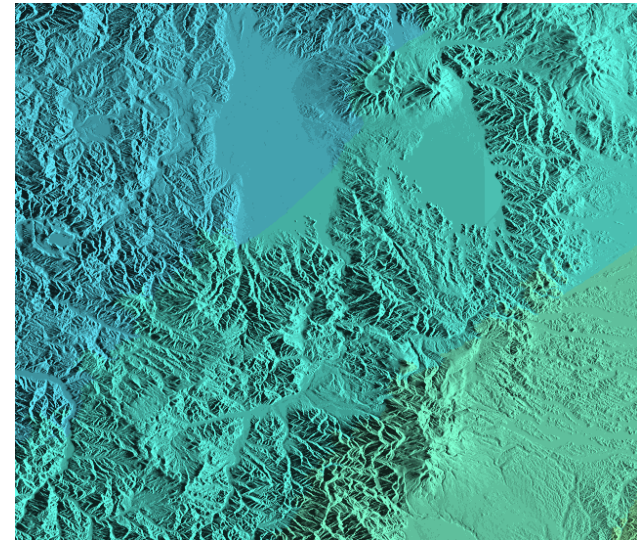
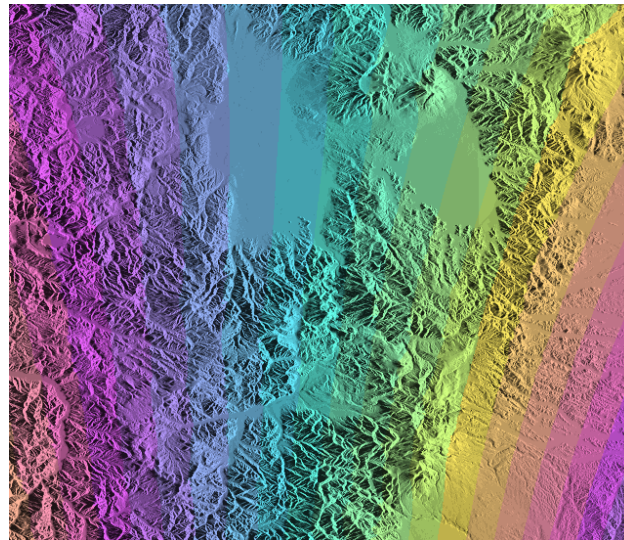
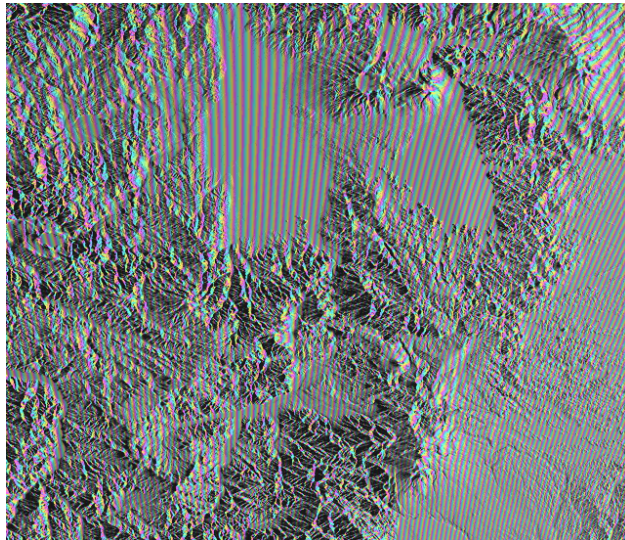
$\Delta B_{\perp}$ 、 $\Delta B_{//}$ によらない(比例したりしない)

人工衛星軌道情報の精度に依存する残軌道縞

軌道精度約100m(例: JERS-1)

軌道精度約1m(ALOS仕様)

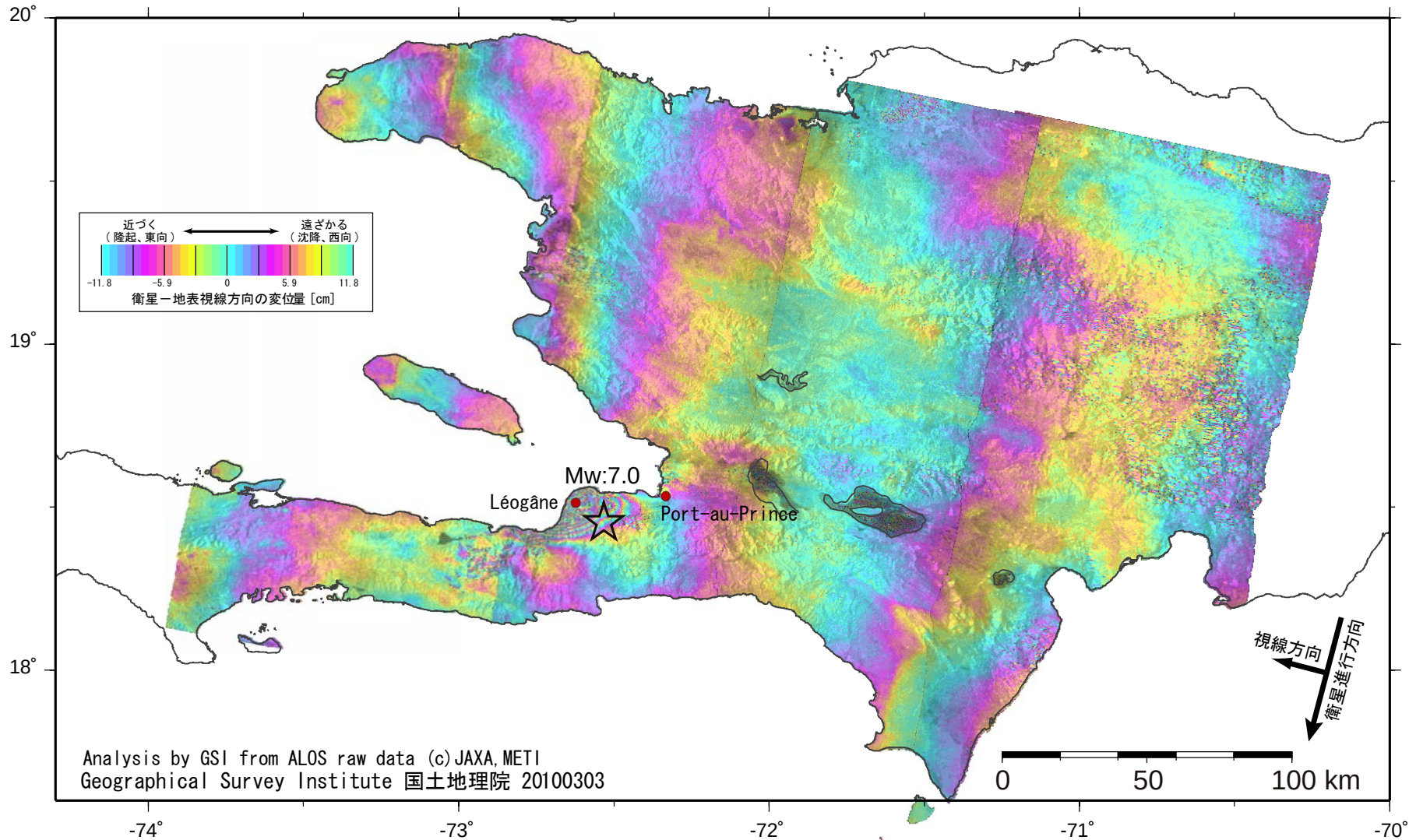
軌道精度約0.1m



2010/1/12ハイチの地震:

PALSAR ScanSAR—ScanSAR干涉解析結果(暫定)

GSISARも2010年3月に対応

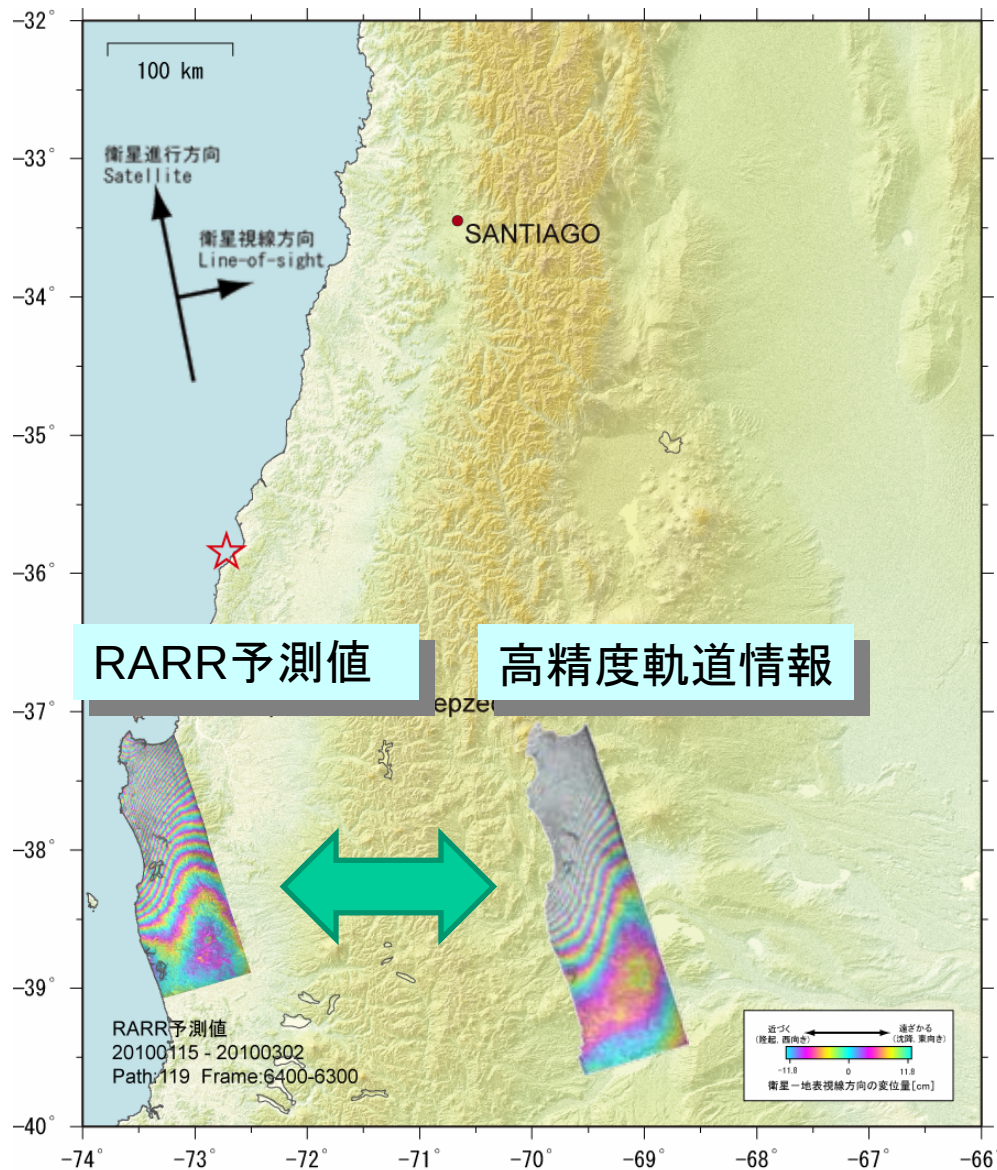


ScanSAR w1 D, Path448, Frame3250 2009/09/26 - 2010/02/11

基線再推定なし Bperp = 約+240 m, 使用軌道精度: ALOS高精度軌道情報

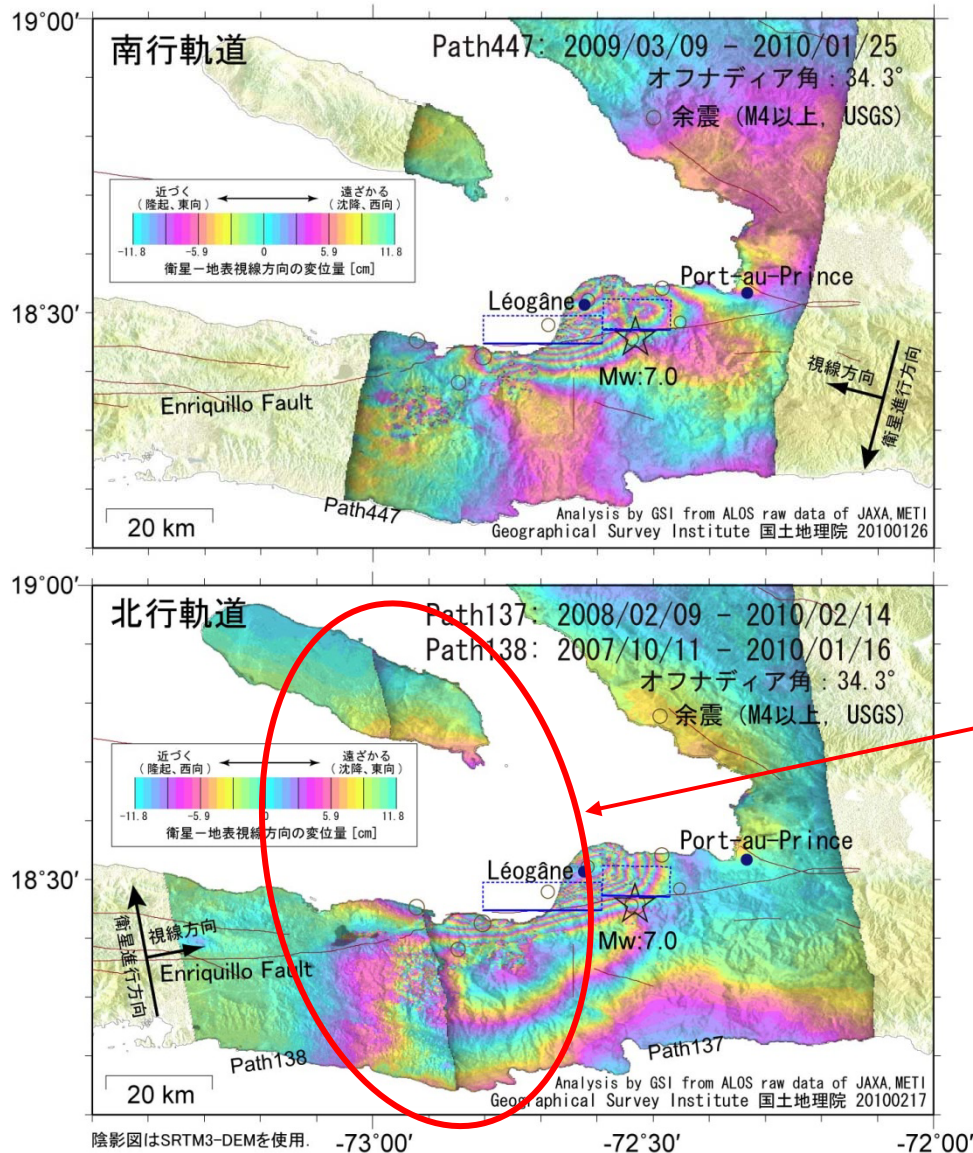
2010/2/27チリ共和国の地震:PALSAR ScanSAR干渉解析結果

RARRと高精度軌道情報の違い



Analysis by GSI from ALOS raw data (c) JAXA, METI
Geographical Survey Institute 国土地理院 2010 年 3 月

軌道精度が非常に高い例



ソロモンの地震でも隣接パスの干渉画像の位相が良くつながったが、2010年1月ハイチの地震の干渉画像のパス間の位相差は3cm程度であり、4回観測の軌道決定精度は、3cmより高いことがわかる。

国土地理院ホームページ

<http://www.gsi.go.jp/cais/topics-topic100112-index.html>

ALOS-2の理想像 軌道情報精度

ALOS-2に期待されるのは、観測後

「**24時間**以内に精度**0.1m**の高精度軌道情報が提供されること」

「**1時間**以内に精度**10m**」

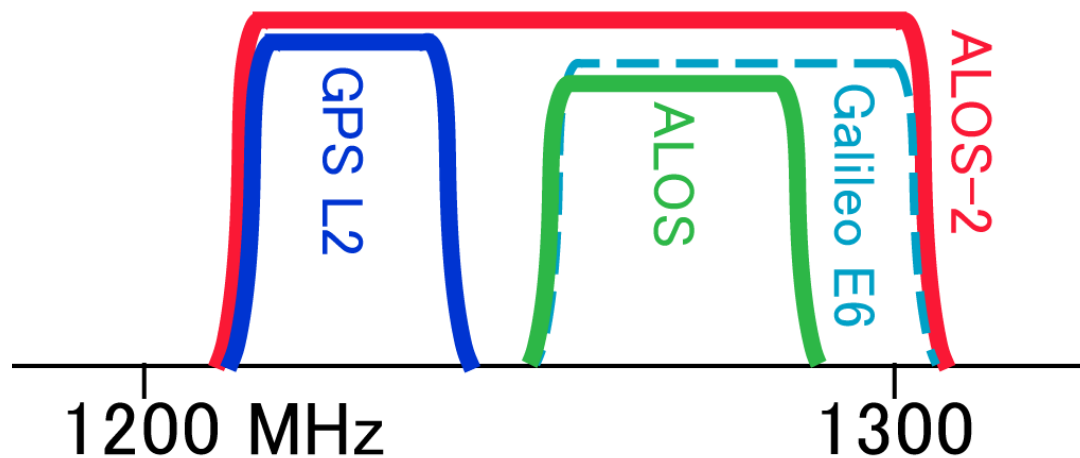
これにより、ALOS-2及びALOS-2データの価値が上がる。

軌道情報精度 マイナス要因

- 高分解能化によるGPS信号との干渉

	中心周波数	バンド幅	最小周波数	最大周波数
	MHz	MHz	MHz	MHz
ALOS	1270.00	28.00	1256.00	1284.00
ALOS-2	1257.50	84.00	1215.50	1299.50
GPS L2	1227.60	20.46	1217.37	1237.83
Galileo E6	1278.75	40.92	1258.29	1299.21

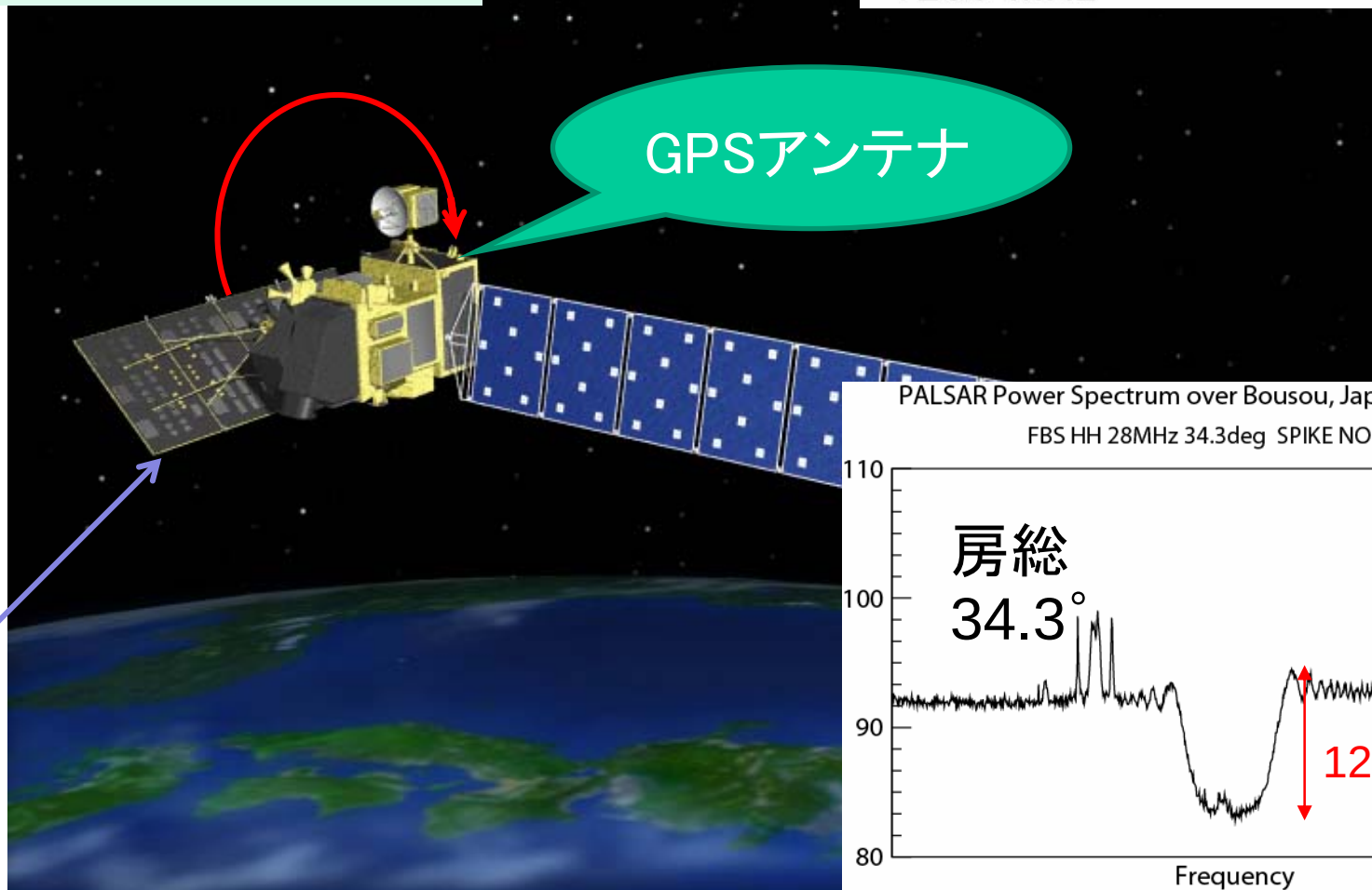
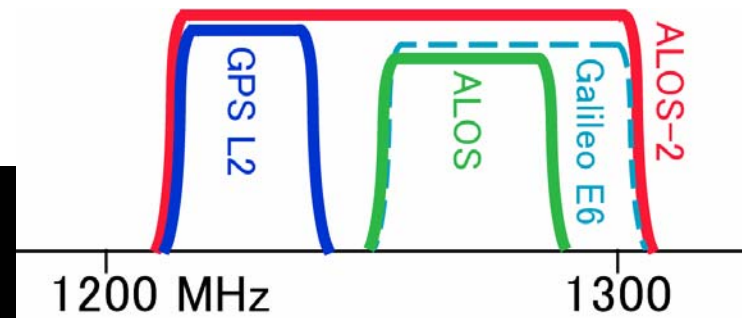
例



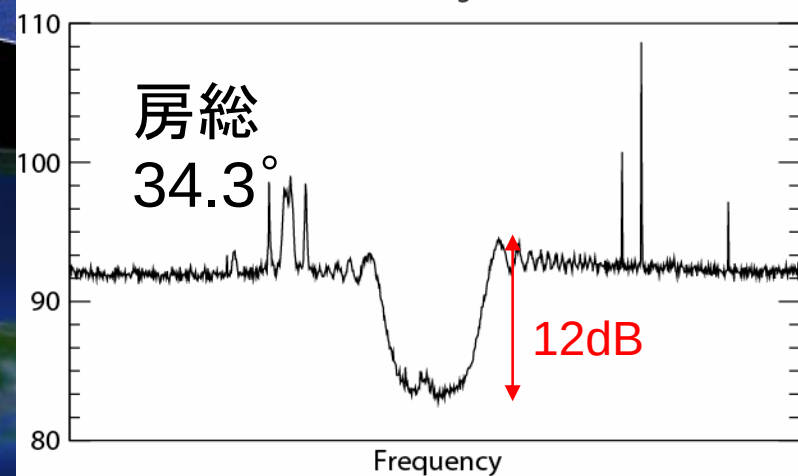
電波干渉への
対策が必要

ALOS-2では GPS信号とSAR が干渉する？

- 1) GPS測位精度低下
- 2) SAR画像・位相への影響



PALSAR Power Spectrum over Bousou, Japan Aug 08, 2006
FBS HH 28MHz 34.3deg SPIKE NOISE



理想のGPSRとGPSA設置環境

- ・ 広帯域化により, ALOS-2搭載のGPSRによる測位環境が厳しくなる反面, 高精度軌道情報高精度化の必要性は増している。
- ・ そこで, ALOS-2搭載のGPSR, GPSAには, 次の性能・条件が必要とされる。

- 1) L1/L2 2周波**10**衛星以上同時受信.
- 2) GPS衛星捕捉性能の高い受信機.
- 3) GPS衛星の視野を確保する.
全方位についてElev. $< 5^\circ$

衛星搭載型GPSRの例

- ALOS用GPSR
 - 国産のreceiver
 - L1/L2擬似距離・位相, 6衛星同時受信
- GRACE用GPSR
 - Blackjack receiver (JPL/NASA製)
 - L1/L2擬似距離・位相, 10衛星同時受信
- TerraSAR-X用GPSR
 - IGOR receiver (Broad Reach Engineering製)
 - L1/L2擬似距離・位相, 13衛星同時受信
- RADARSAT2 用GPSR
 - LAGRANGE receiver (ALCATEL ALENIA SPACE製)
 - L1/L2擬似距離・位相, 12衛星同時受信

地震・火山観測に有効なALOS-2の理想像

1. L-band(すばらしい！◎高いコヒーレンス，×GPSとの干渉)
2. SAR専用衛星(昼のお仕事も可能に。東西両方向からの観測が可能に。すばらしい！)
3. 日本は，高分解能中心(高いコヒーレンス，地殻変動勾配に強い)
海外は，ScanSAR中心(広範囲を効率的に観測可能)
4. 軌道制御範囲が**直径500m以内**(Zero-baselineを目指してほしい)
5. **軌道情報精度が0.1m以内**(有川さんがんばってください。)
10衛星以上同時受信可能なGPSR. 視野の広いGPSA設置.
6. 入射角の範囲: ① 34° ，② 41° ，③ 21°
7. 余効変動の観測も重要。
8. 同時期(10日以内)の東西両方向からの観測が必要：
降交右観測と昇交左観測は前者優先。
9. Yaw SteeringはON。
10. PRF変更は本州以外の場所で行うこと。

Seed Questions (地震・火山セッション) ⇒ Seed Answers (2009/4/21)

1) SARモード(高分解能・ScanSAR, 偏波)は何か良いですか？

⇒ ①日本のベース観測(年1回)は高分解能[3m]・単偏波HH

①日本の定期観測(年数回)・世界は高分解能[10m, 6m]・単偏波HH, 最低70kmのSwathを確保。② ScanSARは巨大地震, 発災直後等

2) オフナディア角はどれがよいですか？

⇒ 34~41° を優先。東西両方向からの観測が必須(右を優先)。
どちらかというと, 3つ程度の角度 > 26個の角度

3) 利用設備への要求はありますか？

3-1) 特にデータ提供内容(処理レベル)、データ提供方法

⇒ Level 1.0, 高精度軌道情報のみ後からWebで提供, 誤差情報も提供,
GPS位相データも提供, ALOS(&JERS-1)データのアーカイブ

3-2) 観測要求、またはデータ検索に対する要望は？ ⇒ 地震・火山WG等の枠組みを継続

4) これまでのPALSARの運用でどこまでできたといえますか

⇒ 地震・火山観測で不可欠な基盤観測(多くは代替手段なし)となりつつある。
電離層の影響, 積雪期の干渉等が研究課題。

5) さらに、何があればどこまでできるといえますか？(その他必要なもの)

⇒ $B_{\perp} < 500\text{m}$, 高精度($< 0.1\text{m}$)な軌道情報, 複数回の余効変動観測

6) 観測領域に対する要求は？

⇒ 日本全土, 海外の地殻変動帯(火山の観測頻度は高めに)。

7) 観測頻度に対する要求は？ ⇒ 日本は年5回, 世界は年2回以上。できる限り高頻度で。

Seed Questions (地震・火山セッション)⇒今回 (2010/3/26)

1) SARモード(高分解能・ScanSAR, 偏波)は何か良いですか？

⇒ ①日本のベース観測(年1回)は高分解能[3m]・単偏波HH

②日本の定期観測(年数回)は高分解能[10m, 6m]・単偏波HHと ScanSAR

③海外はScanSARと高分解能[10m]・単偏波HH

2) オフナディア角はどれがよいですか？

⇒ $34 \sim 41^\circ$ を優先。東西両方向からの観測が必須(右を優先)。
どちらかという、3つ程度の角度 > 26個の角度

3) 利用設備への要求はありますか？

3-1) 特にデータ提供内容(処理レベル)、データ提供方法

⇒ Level 1.0, 高精度軌道情報のみ後からWebで提供, 誤差情報も提供,
GPS位相データも提供, ALOS(&JERS-1)データのアーカイブ

5) さらに、何があればどこまでできるといえますか？(その他必要なもの)

⇒ $B_{\perp} < 500\text{m}$, 高精度($< 0.1\text{m}$)な軌道情報, 複数回の余効変動観測

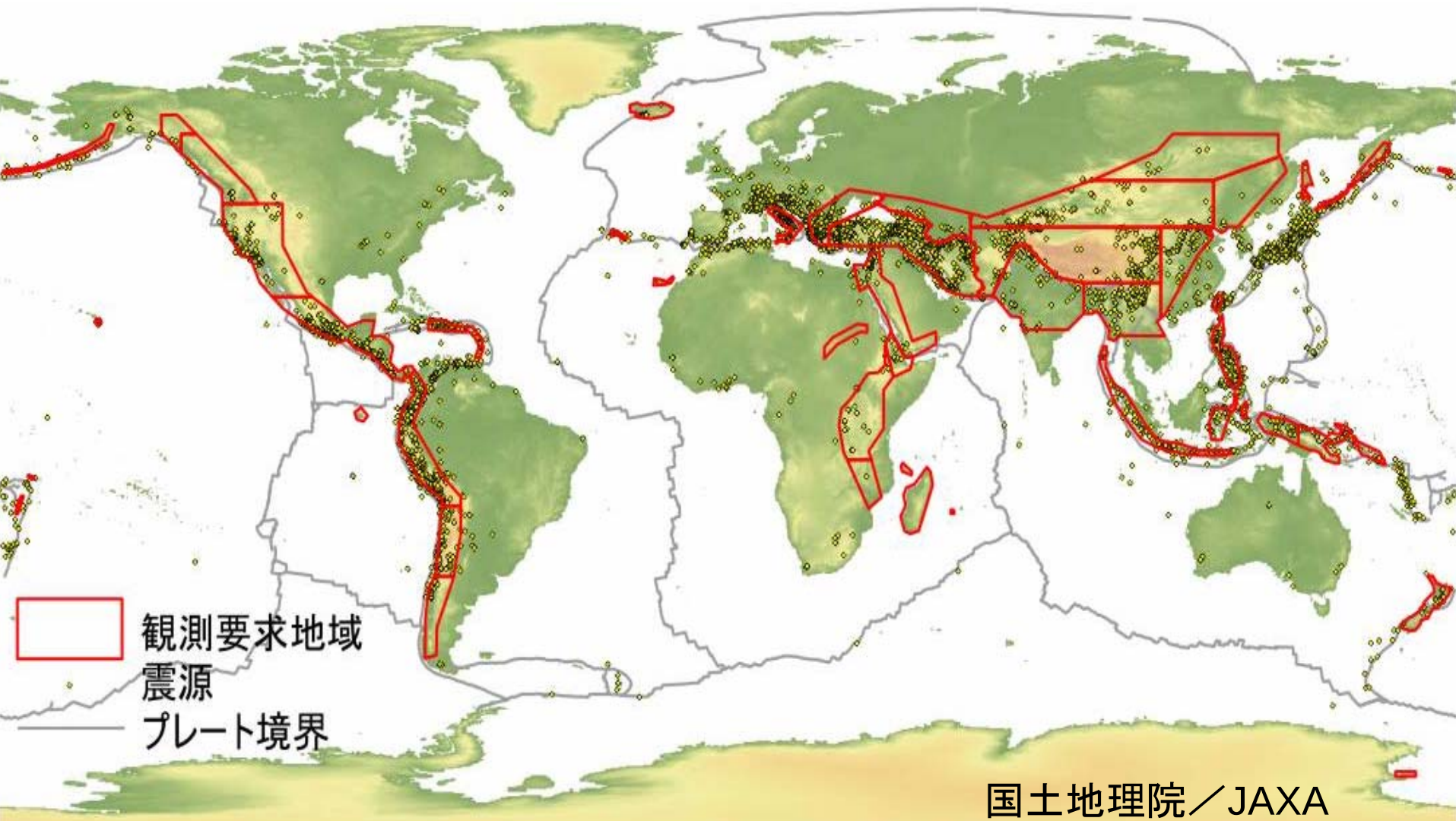
6) 観測領域に対する要求は？

⇒ 日本全土, 海外の地殻変動帯(火山の観測頻度は高めに)。

7) 観測頻度に対する要求は？

⇒ 日本は年5回, 世界は年2回以上。できる限り高頻度で。

世界の地殻変動帯のALOS PALSAR観測要求地域



世界の地殻変動帯のALOS PALSAR観測要求地域

これをRefineして観測資源を有効利用しましょう

