

# 大地にも、精密検査が必要だ。

人間に、健康診断があるように、地球にはだいち2号がある。



地震、火山噴火、土砂崩れなどの自然災害や、森林伐採などの環境破壊により、私たちの足元で大地は今日も動き、変化しています。宇宙から地球を診て、地上には分からない大地や海の変化を地上に伝える。それが、「だいち2号」のミッションです。前号機の「だいち」のミッションを引き継いで、大地や海を精密検査します。

2015年11月17日

陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)データ利用シンポジウム

## ダムの検討事例

### ～大地にも、「インフラにも」、精密検査が必要だ。～

国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部  
大規模河川構造物研究室

○佐藤弘行、佐々木 隆、小野寺 葵

国立研究開発法人土木研究所  
水工研究グループ水工構造物チーム

榎村康史、小堀俊秀

本発表の内容には、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)の「点検・モニタリング・診断技術の研究開発」において、「衛星SARによる地盤および構造物の変状を広域かつ早期に検知する変位モニタリング手法の開発」(H26～H30予定)の課題で実施中の内容を含みます。

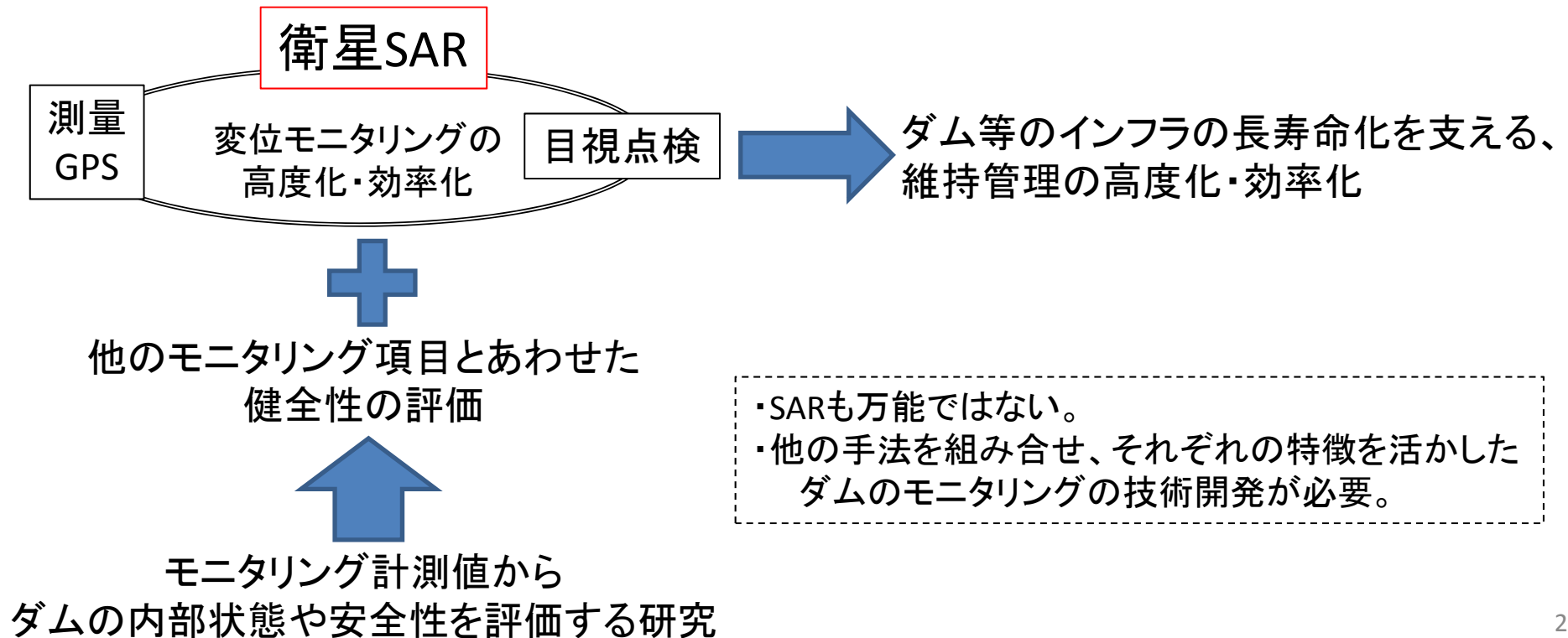
# 目標・目的



## ダム の 長 寿 命 化 を 支 える、効 率 的・効 果 的 な ダ ム の モ ニ タ リ ン グ 手 法 の 開 発

● 色々な技術が開発、検討されているが、SARは有力な変位モニタリング技術の一つ

- ・効率的・・・データ取得低コスト(計器不要)、広範囲
  - ・効果的・・・高精度、面的、高解像度、定期的・高頻度
- ← 平常時にも、災害時にも、使うことが可能



# 背景 ダムの高齢化、人員・予算不足



## 日本の型式別管理ダム数

型式別	ダム数
ロックフィルダム	326
ゾーン型ロックフィルダム (コンクリートフェイスング含む)	304
重力式コンクリート・フィル複合ダム	22
コンクリートダム	1092
アーチダム	53
バットレスダム	6
重力式ダム	1004
重力式アーチダム	12
中空重力ダム	14
マルチプルアーチダム	3
アースダム	1200
その他ダム	45
台形CSGダム	2
アスファルトフェイスングフィルダム	16
アスファルトコアフィルダム	1
フローティングゲートダム	18
不明	8
計	2663

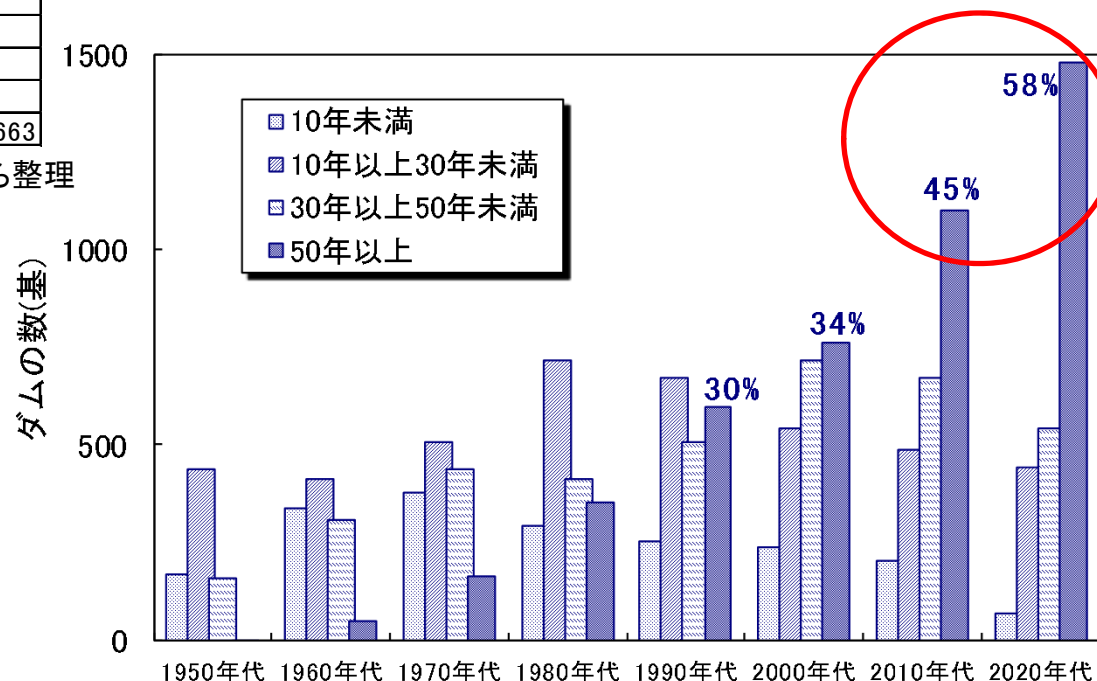
出典:ダム便覧、日本ダム協会、2013年3月31日現在、から整理

### 【インフラの老朽化や災害への社会的関心の高さ】

- ・2012年12月笹子トンネル天井板崩落事故
- ・頻発する災害(地震、台風、火山、etc)

### 【ダム】

今のところ変形が問題となっている事例はないが、モニタリングの効率化・高度化は重要



### 【私とSARとの出会い】

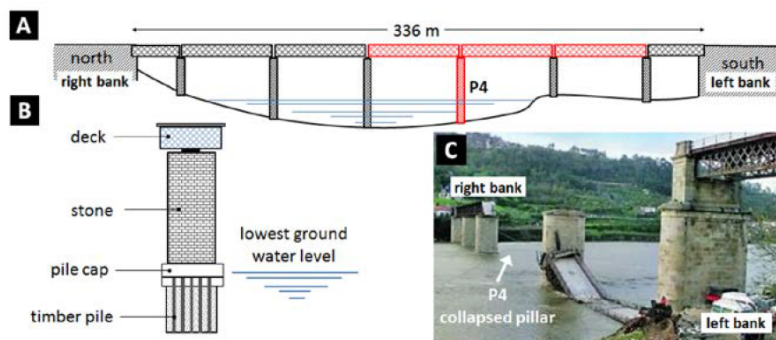
- ・2008年6月岩手宮城内陸地震で沈下したダムの変位量検討  
(地震前の詳細データがSARしかない)  
(アーカイブデータ)

# 背景 衛星SARにより大きな事故を回避できる可能性(個人的に印象的な論文)

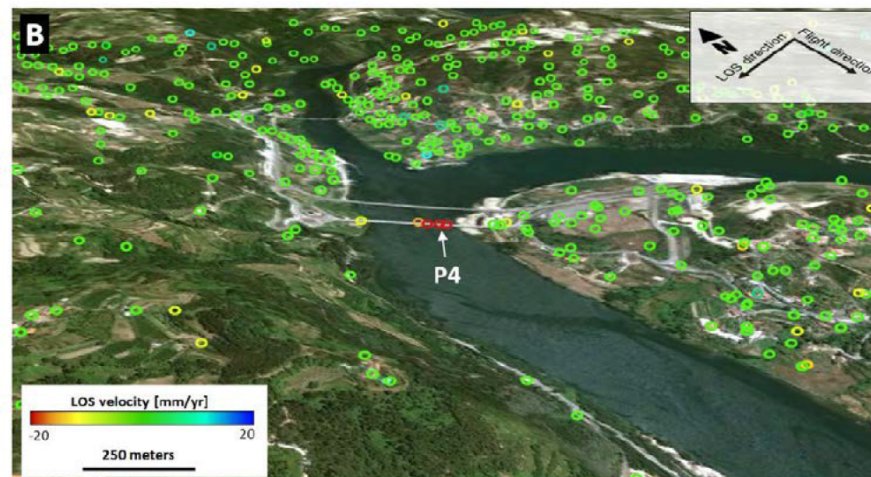
## 衛星SARによる構造物の変位モニタリングの研究事例—橋梁—(崩壊後)



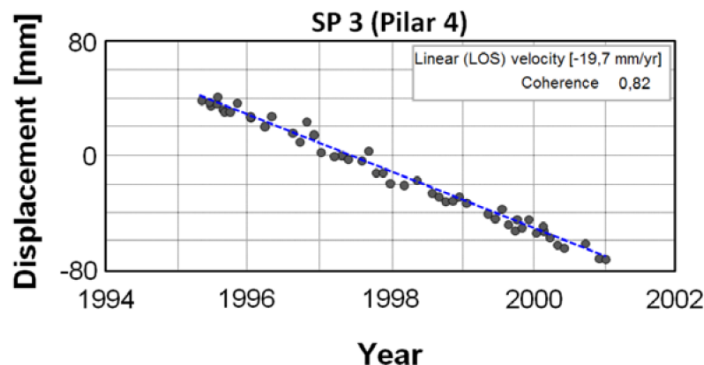
- ・2001年3月4日、ポルトガルのHintze Ribeiro橋(1887年供用開始)が崩壊、59人死亡
- ・崩落の原因は、老朽化と橋脚の洗掘、と推定
- ・1995年5月から崩壊(2001年3月)までの、52データを使用(10ERS-1+42ERS-2、Cバンド)
- ・崩壊した橋脚で、最大20mm/年の直線的な変位傾向(沈下or西方)をとらえた



Hintze Ribeiro橋の模式図(上段A、左下B)、崩壊状況(右下C、橋脚P4は流出)



衛星SARによるHintze Ribeiro 橋と周辺の年平均変位量  
P4が流出した橋脚(年変位量大きい=赤い)



橋脚P4における衛星SARによる変位量の時系列データ

橋梁崩壊後の研究事例ではあるが、衛星SARによるインフラのモニタリングの可能性を示す研究事例と考えている。

J. J. Sousa and L. Bastos : Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 659–667, 2013

# ダム の 主 な 種 類 ( 型 式 )



ダム の 型 式



アーチ式コンクリートダム(黒部ダム)

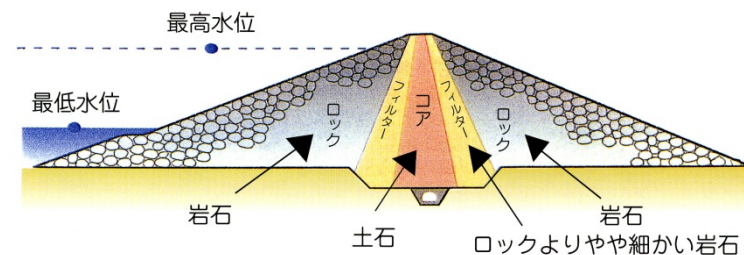
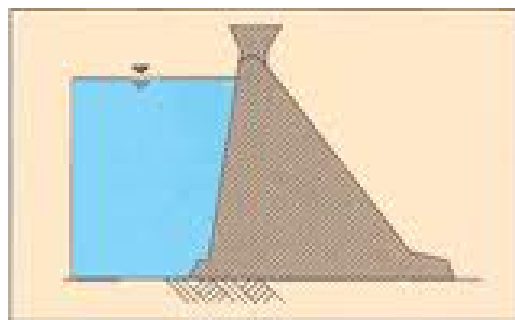
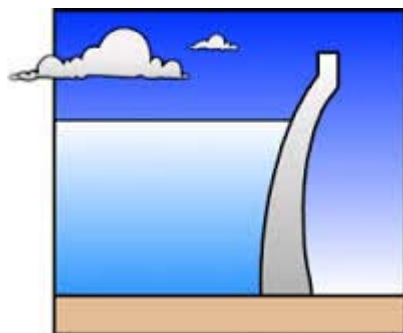


重力式コンクリートダム(奥只見ダム)



ロックフィルダム(高瀬ダム)

断面図



上流面の 勾配	ほぼ垂直	ほぼ垂直	20° ~ 30°
下流面の 勾配	ほぼ垂直	45° 以上	20° ~ 30°



- ・上下流面の勾配が急だと、干渉SARは困難となる
- ・勾配が比較的緩やかで干渉SARが可能な**ロックフィルダム**をまずは主ターゲット

# ダムの安全管理・・・変位計測について



## 河川管理施設等構造令 (S51年、政令)

第十三条 **ダムには、次の表の中欄に掲げる区分に応じ、同表の下欄に掲げる事項を計測するための装置を設けるものとする。**

(※最低限の計測項目を規定)



堤高50m未満の重力式コンクリートダム以外、  
**全てのダムで変形(変位)計測を義務付け** -----> 衛星SARの精度の比較検証が可能

項	区 分		計 測 事 項
	ダムの種類	基礎地盤から堤頂までの高さ(単位 m)	
一	重力式コンクリートダム	50未満	漏水量 揚圧力
		50以上	漏水量 <b>変形</b> 揚圧力
二	アーチ式コンクリートダム	30未満	漏水量 <b>変形</b>
		30以上	漏水量 <b>変形</b> 揚圧力
三	フィルダム	ダムの堤体がおおむね均一の材料によるもの	漏水量 <b>変形</b> 浸潤線
		その他のもの	漏水量 <b>変形</b>

# ダムの安全管理・・・変位計測について



## 河川管理施設等構造令 (S51年、政令)

第十三条 **ダムには、次の表の中欄に掲げる区分に応じ、同表の下欄に掲げる事項を計測するための装置を設けるものとする。**

(※最低限の計測項目を規定)

### 変形(変位)計測の標準的な頻度

	コンクリートダム			フィルダム		
	第Ⅰ期	第Ⅱ期	第Ⅲ期	第Ⅰ期	第Ⅱ期	第Ⅲ期
漏水量*)	1回/日	1回/週	1回/月	1回/日	1回/週	1回/月
<b>変形</b>	<b>1回/日</b>	<b>1回/週</b>	<b>1回/月</b>	<b>1回/週</b>	<b>1回/月</b>	<b>1回/3月</b>
揚圧力	1回/日	1回/週	1回/月			

第Ⅰ期 — 湛水開始～試験湛水終了まで(概ね1～2年程度)

第Ⅱ期 — 第Ⅰ期以降～**挙動が定常状態**になるまで(3～10年程度)

第Ⅲ期 — 第Ⅱ期以降～(10年程度～)

**第Ⅱ・Ⅲ期のダムの変位計測頻度は、衛星SARの回帰日数(11～46日)と合致  
⇒ ダムの挙動が安定している、第Ⅱ・Ⅲ期の変位計測へのSARの適用可能性**

# ロックフィルダムの測量点(可動標的)とGPSセンサ 大保脇ダムの例



侵食防止等の目的で、堤体表面に1m程度の岩石を敷き詰めている

- 岩石なので植生が繁茂しにくい  
(定期的に伐採して管理している)
- レーダーの反射が良好

(コンクリートダムの変位計測は省略)

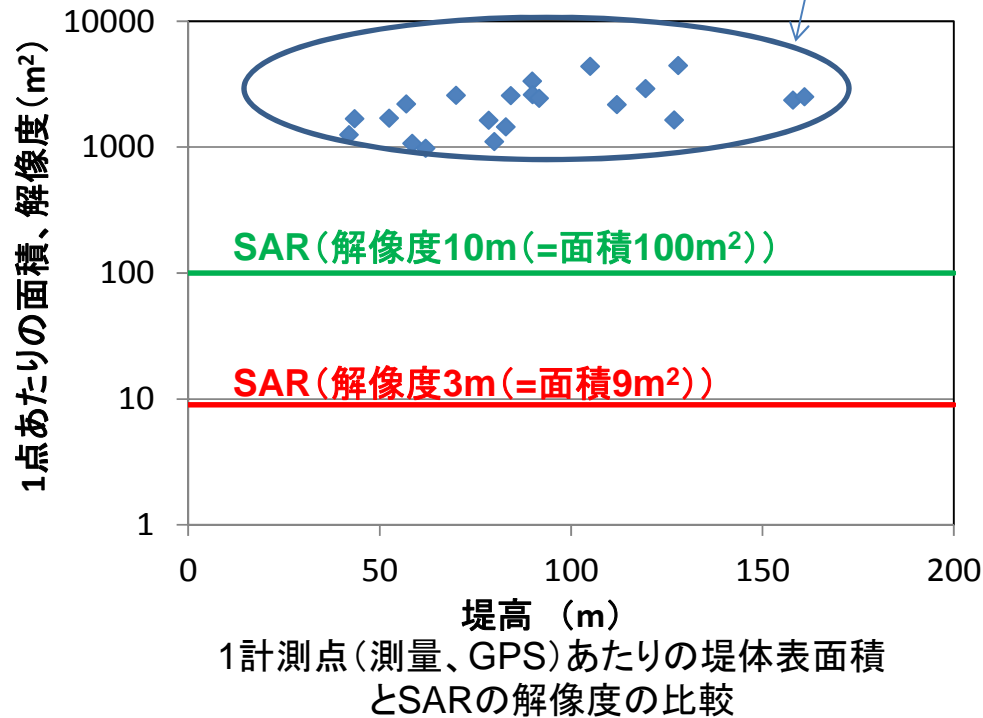


# ダムの変形計測の現状 ⇒ 衛星SARの利点(空間解像度から)



21ロックフィルダムの1計測点あたりの堤体の表面積  
 平均: 4271m<sup>2</sup> (≒ 65mの正方形)

従来法とSARでは解像度のオーダーが異なる



1計測点(測量、GPS)あたりの平均表面積とSARの解像度のイメージ

- 測量、GPSの計測点を増やすことはコスト的に困難(解像度の飛躍的な向上も困難)

## 【SARのメリット】

- SARは地上の計測設備が不要
- SARは従来法(測量、GPS)よりも高空間解像度
  - これまで計測していなかった箇所の計測が可能
  - 目視では見逃す可能性のある局所的・微小な変状の兆候の把握が可能

変位モニタリングについて  
**「精密検査」**  
 が実施できる可能性

# これまでの検討結果



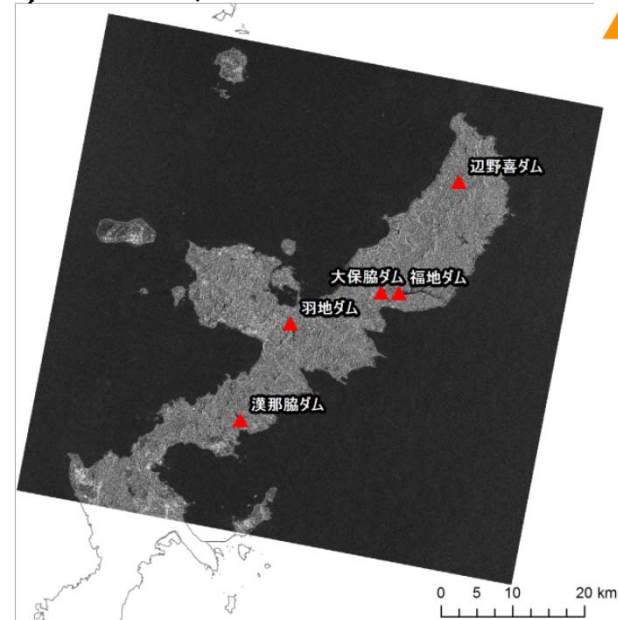
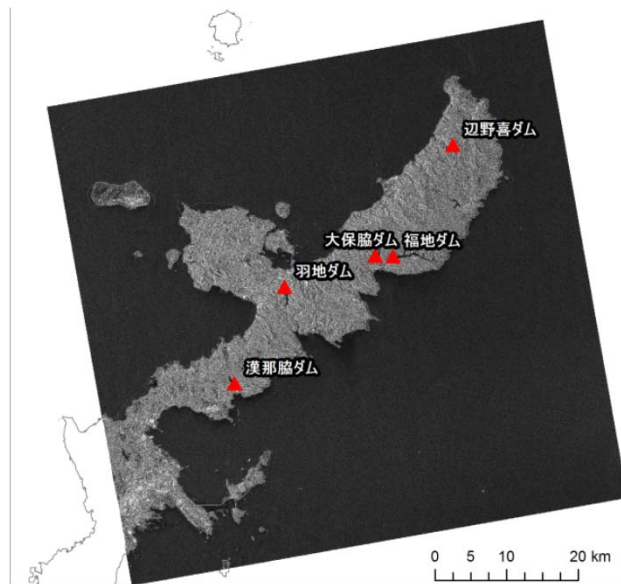
## 検討対象ダム・・・沖縄にある5基のロックフィルダム



ダム名	大保脇ダム	羽地ダム	漢那脇ダム	辺野喜ダム	福地ダム
堤高(m)	66	66.5	37	35	91.7
堤頂長(m)	445	198	500	330	260
竣工年	2010	2004	1993	1987	1974
上流面勾配 (括弧は°)	1:3.0 (18.4)	1:2.7 (20.3)	1:3.1 (17.9)	1:2.5 (21.8)	1:2.25 (24.0)
下流面勾配 (括弧は°)	1:2.7 (20.3)	1:2.2 (24.4)	1:2.1 (25.5)	1:2.0 (26.6)	1:2.0 (26.6)

# これまでの検討結果

使用データ: だいち1号 (ALOS/PALSAR)



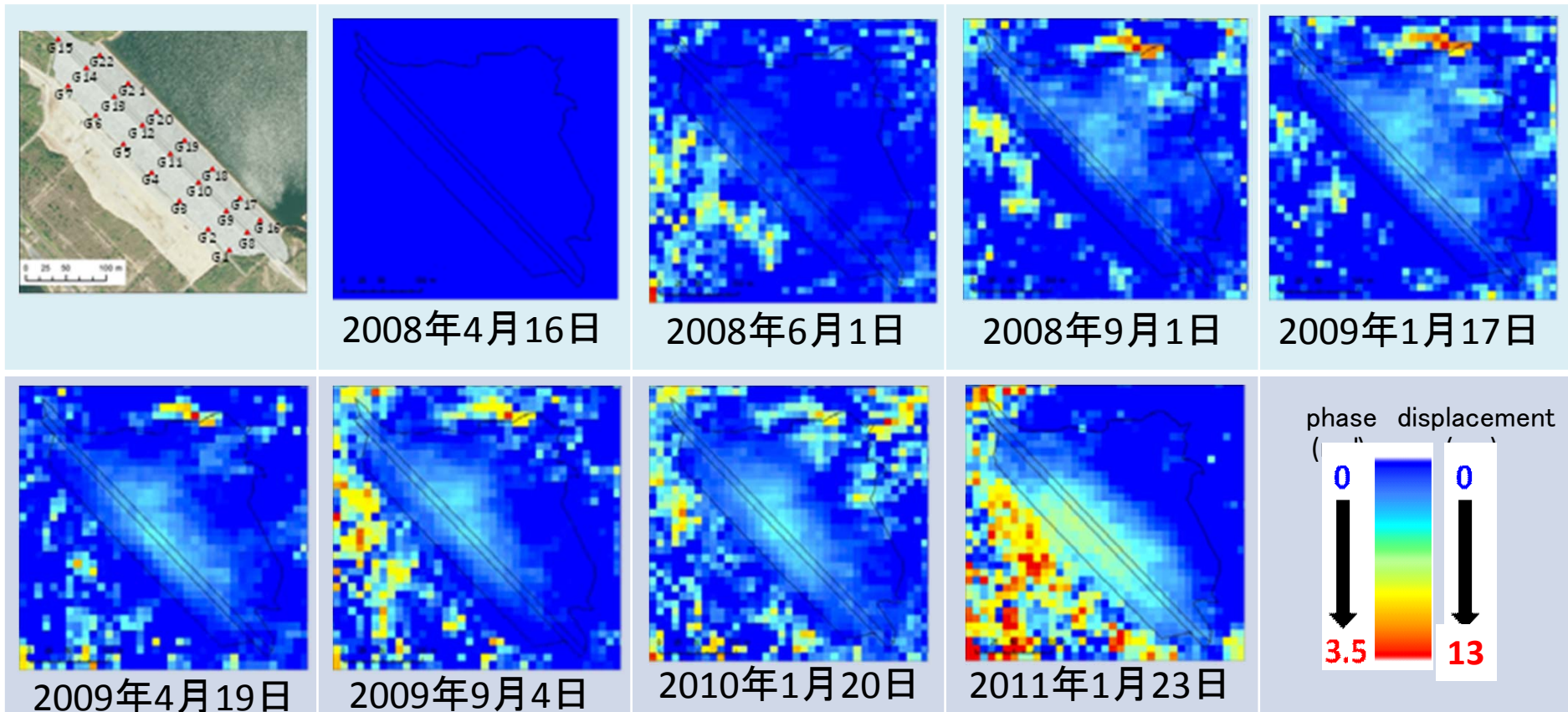
No	Ascending 北行軌道
1	2006/12/6
2	2007/10/24
3	2007/12/9
4	2008/1/24
5	2008/4/25
6	2008/7/26
7	2008/12/11
8	2009/1/26
9	2009/10/29
10	2009/12/14
11	2010/1/29
12	2010/8/1
13	2010/11/1
14	2010/12/17

北行、南行、各14シーン

No	Descending 南行軌道
1	2007/1/12
2	2007/4/14
3	2007/8/30
4	2007/10/15
5	2007/11/30
6	2008/1/15
7	2008/4/16
8	2008/6/1
9	2008/9/1
10	2009/1/17
11	2009/4/19
12	2009/9/4
13	2010/1/20
14	2011/1/23

# これまでの検討結果

時系列干渉SARの結果：大保脇ダム（堤体の盛立完了2006年12月）（南行軌道の例）

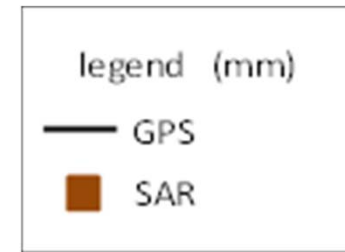
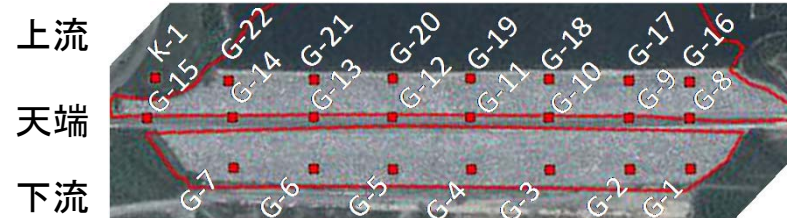


※衛星の視線方向の変位量

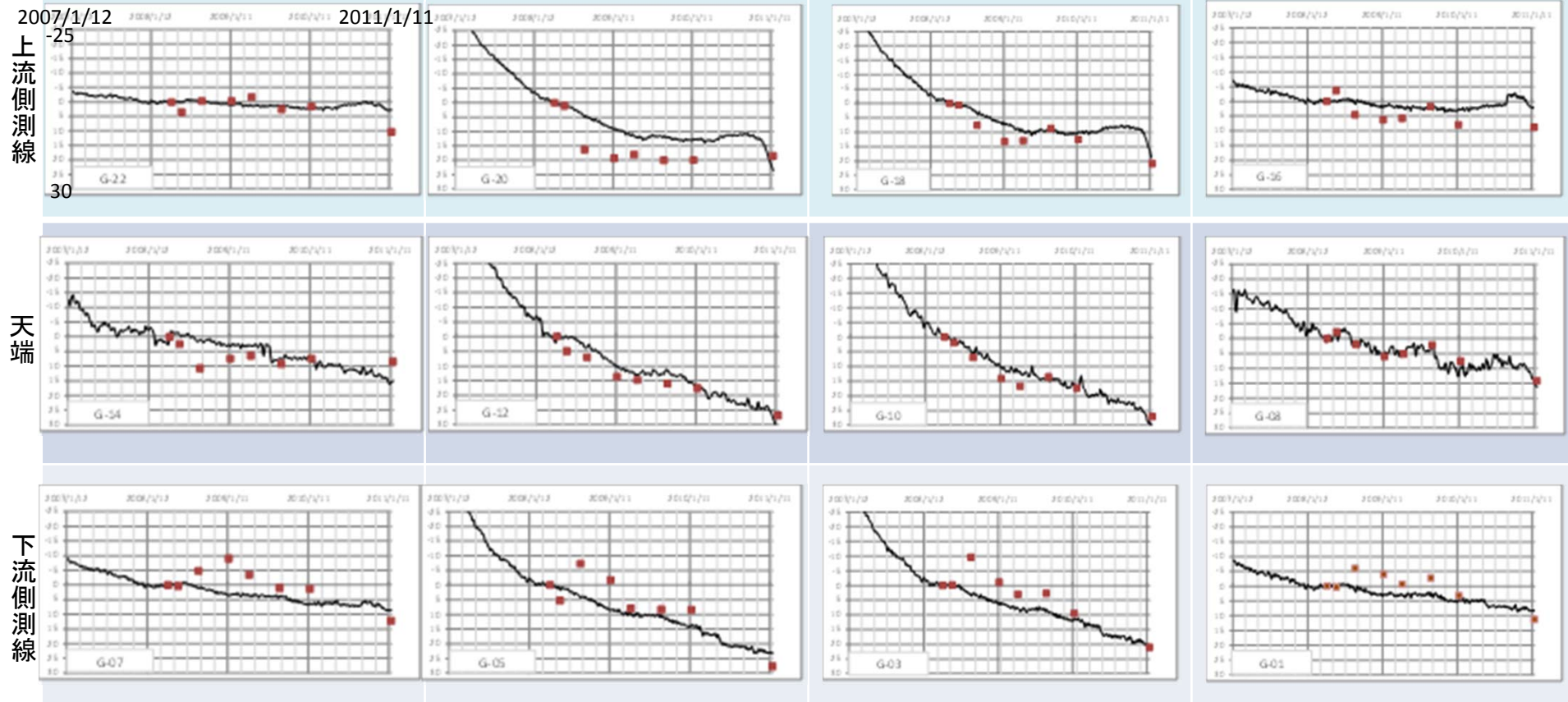
※大保脇ダムは2008年初頭に天端の舗装を実施しているため、2008年以降の結果を表示

# これまでの検討結果

時系列干渉SARの結果：大保脇ダム（堤体の盛立完了2006年12月）（南行軌道の例）



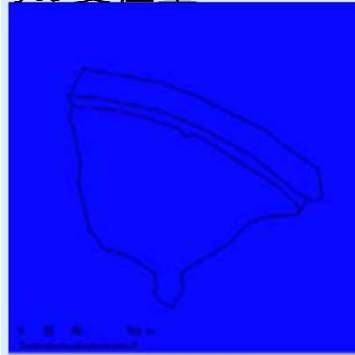
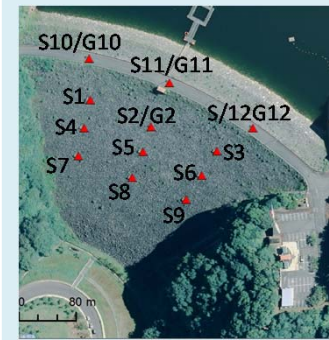
※衛星の視線方向の変位量



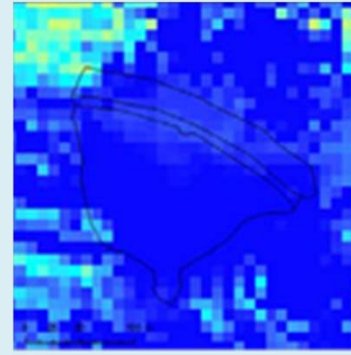
※大保脇ダムは2008年に天端の舗装を実施しているため、2008年以降の結果を表示

# これまでの検討結果

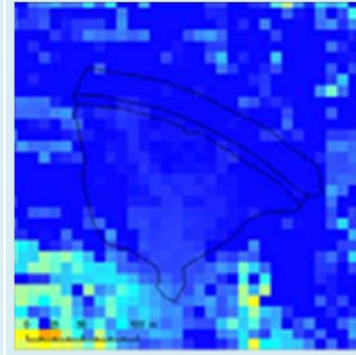
時系列干渉SARの結果：福地ダム(竣工1976年)(南行軌道の例)  
 ※衛星の視線方向の変位量



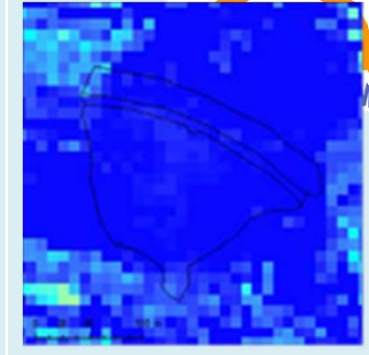
2006年1月12日



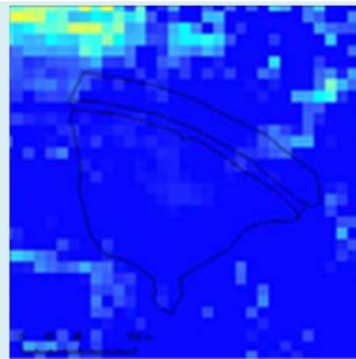
2007年4月14日



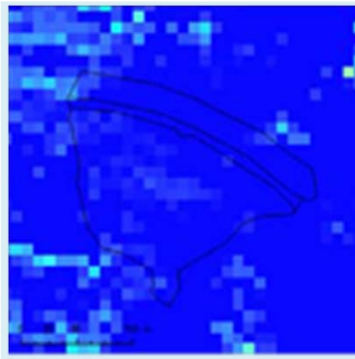
2007年8月30日



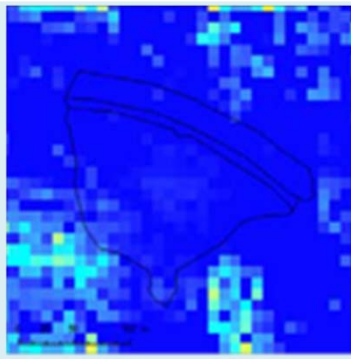
2007年10月15日



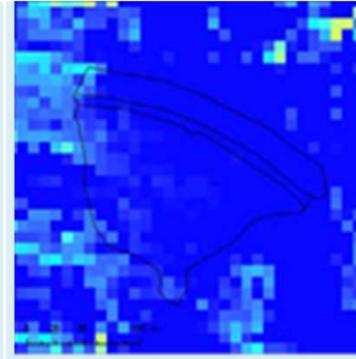
2007年11月30日



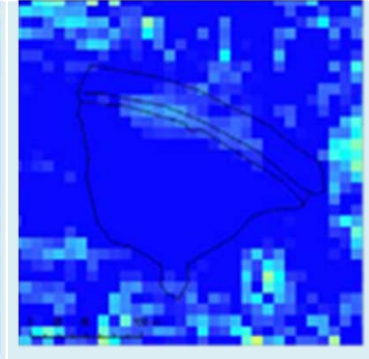
2008年1月15日



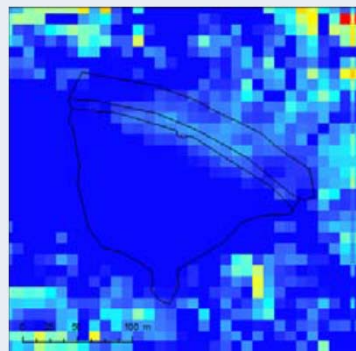
2008年4月16日



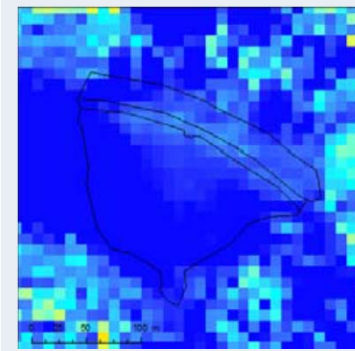
2008年6月1日



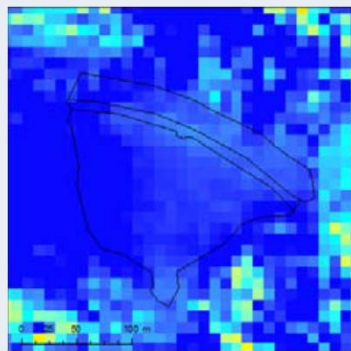
2008年9月1日



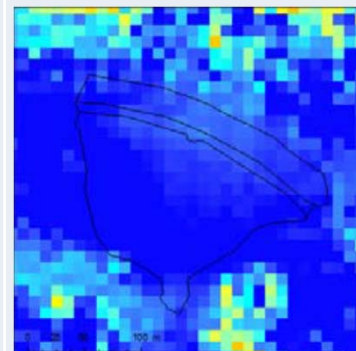
2009年1月17日



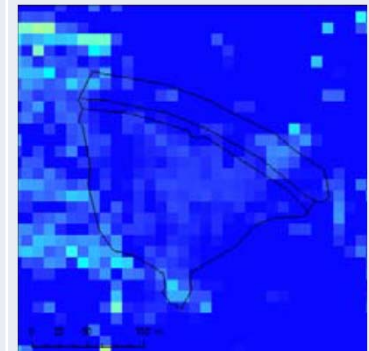
2009年4月19日



2009年9月4日



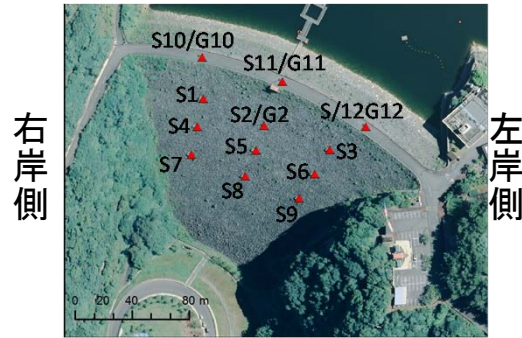
2010年1月20日



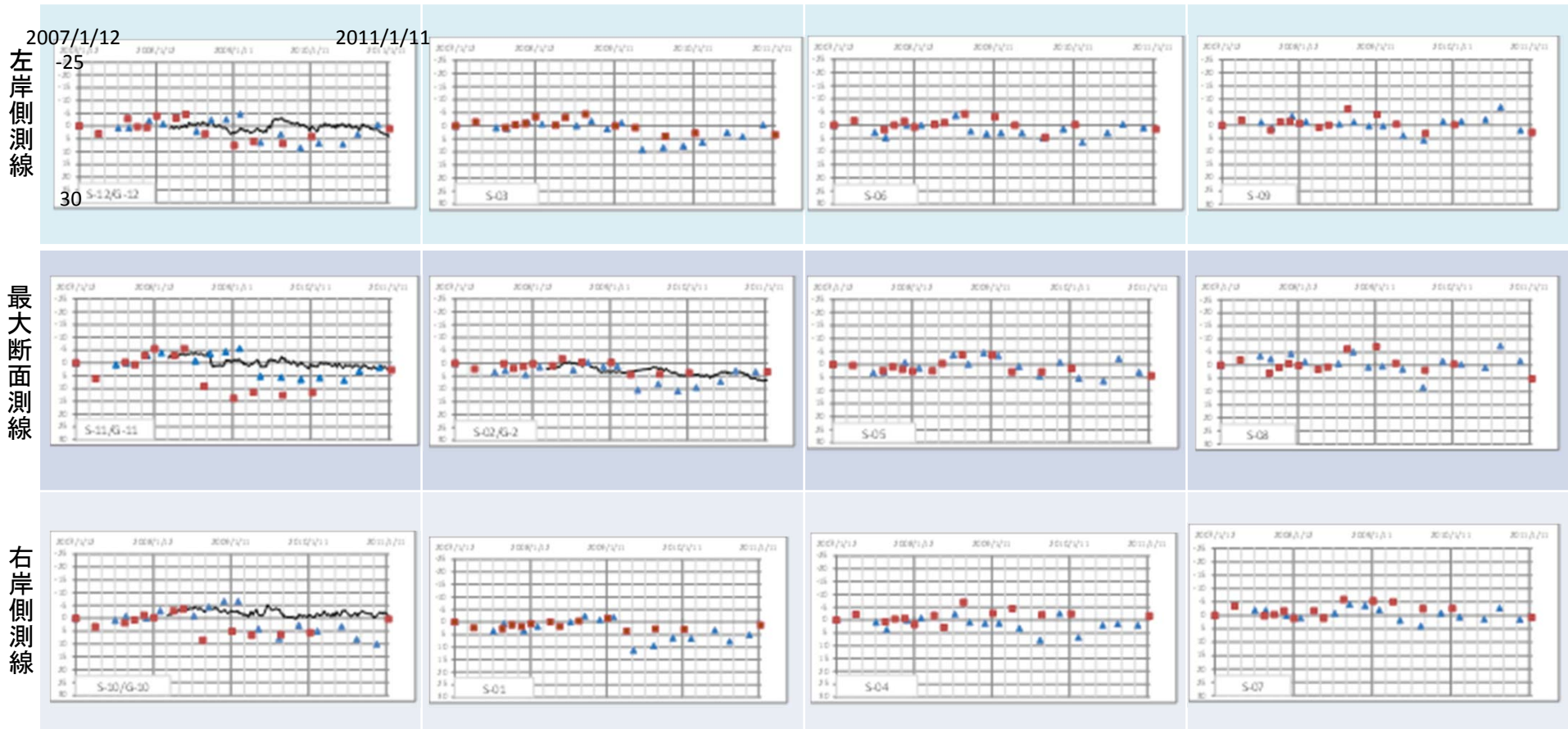
2011年1月23日

# これまでの検討結果

時系列干渉SARの結果: 福地ダム(竣工1976年)(南行軌道の例)



※衛星の視線方向の変位量



# これまでの検討結果

時系列干渉SARの結果(北行、南行、ともに各14シーン全部使用)



SARとGPSの平均誤差(RMSE)(mm)

	北行軌道	南行軌道	測量・GPS 計測点数
大保脇ダム 2008以降	6.16	5.95	22
羽地ダム	4.08	4.75	14
福地ダム	4.53	4.14	12
漢那脇ダム	4.41	6.58	28
辺野喜ダム	5.62	7.9	17
平均誤差	4.96	5.86	

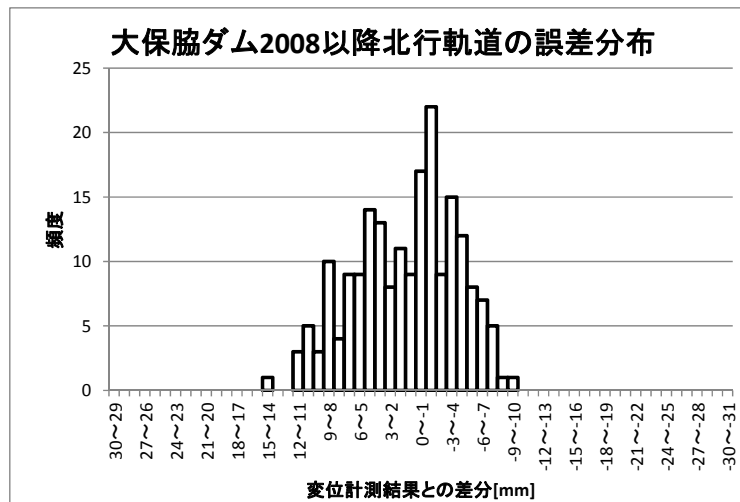
最大誤差(mm)

	北行軌道	南行軌道
大保脇ダム 2008以降	15.34	24.97
羽地ダム	11.69	11.53
福地ダム	13.49	14.86
漢那脇ダム	15.41	27.10
辺野喜ダム	15.36	26.00

10mm以上の誤差は5%以下の割合

約5mmの平均誤差

誤差の  
頻度分布



※大保脇ダムは2008年に天端の舗装を実施しているため、2008年以降の結果を記載

これまでの成果

- ・ロックフィルダムについては、  
精度的にはほぼ実用的であることを確認

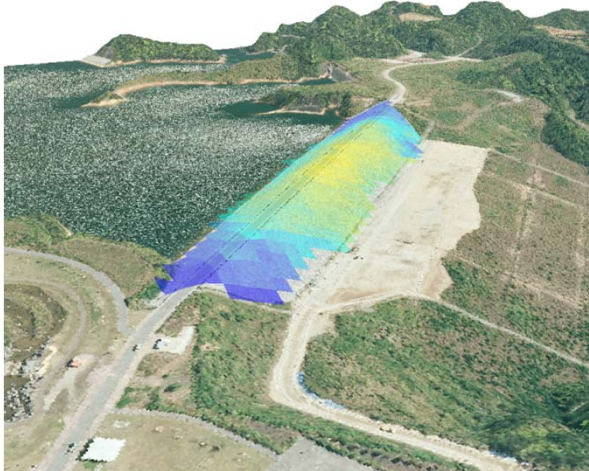


「だいち2号」のデータにより、  
精度向上を期待

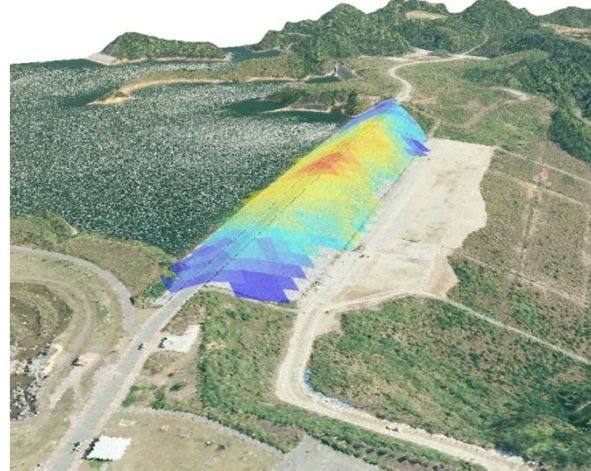


# これまでの検討結果

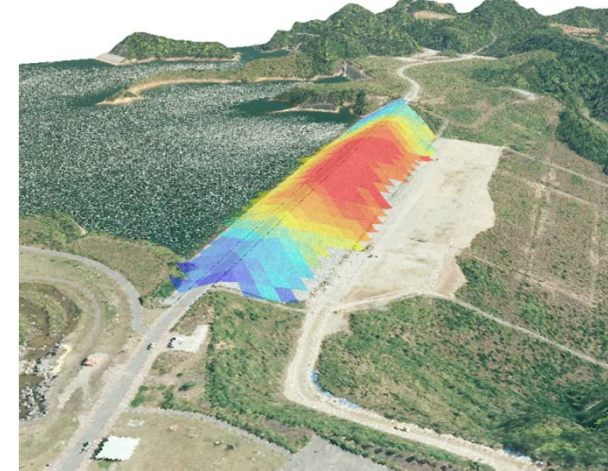
時系列干渉SARの結果：大保脇ダム（堤体の盛立完了2006年12月）（南行軌道の例）



2007年1月12日～2007年11月30日



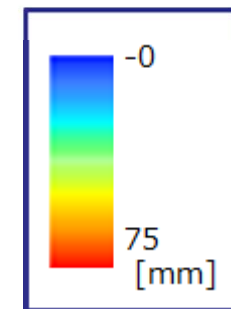
2007年1月12日～2008年9月1日



2007年1月12日～2011年1月23日

Japan Asia Group  
国際航業株式会社

- ・管理者に分かりやすいような見せ方の工夫が必要  
→ 干渉縞（位相差）が連続しているのは分かりにくい
- ・異状のスクリーニングの自動化等、今後の課題  
例：SARで変位の異状箇所を自動警告 → 管理者が重点的に目視点検  
（目視点検の効率化・高度化）



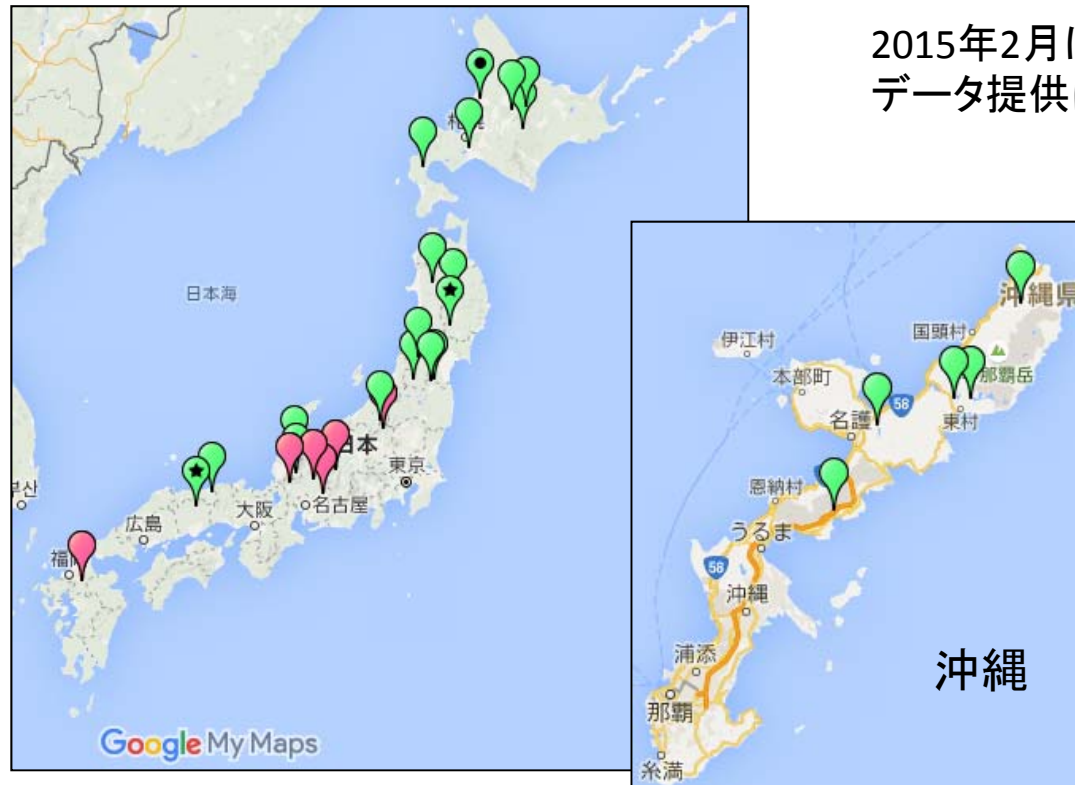
（参考）この程度の変形・沈下は設計の想定範囲内。

# 今後の予定 (H28年度予定)



29基の国交省管理(直轄)ロックフィルダムで試行

— JAXA様に「**だいち2号**」の観測要求済



2015年2月に、JAXA・土研・国総研で  
データ提供に関する協定を締結

- ・変位の計測精度検証、従来法とのコスト比較
- ・従来法では計測していない箇所の変動評価等、SARの特徴を活かしたモニタリング手法の提案
- ・だいち1号のデータとの比較、など

# 実用化に向けた課題（技術的課題ではない課題）



例:対象はダム、平常時の定期観測の場合

	対象
(1)	個々のダム管理者毎(現在の測量と同じ)
(2)	地方整備局、県単位
(3)	国交省(直轄)
(4)	国交省所管(国交省、県)

(1ダムあたりのコスト減の可能性)  
対象が広域になる

↓

構造物や地盤変動を日本全国一括して実施することが理想的とは思いますが、ある程度のまとまりで実施せざるをえないと考えられる

↓

・どういまとまりで変位解析を行うのが効率的・効果的、かつ現実的か？

●インフラの管理者と、SAR関係者の意思疎通が不可欠

- ・インフラの管理者にとって、SARは難しい(SARの結果をインフラの管理者が理解しやすい工夫が必要)
- ・SAR関係者にも、ある程度インフラについて知ってもらう必要がある

# 要望

ダムのモニタリングにSARを使うために必要だと思っている仕様等



項目	要望スペック	理由概要
確実性	常に複数機が運用	・常時計測が義務付け
観測頻度	1～2週間に1回程度以上	・現在の測量の観測頻度以上
価格	1万円程度以下	・実用化に向けて、コストも課題
解像度	1m程度	・ロックフィルダムの外側を覆う岩石の大きさが約1m ・管理者がイメージしやすい
計測精度	ロックフィルダム: 数mm	・現在の測量やGPS程度

## 【参考資料】

- (1) H Sato, Y Yamaguchi, T Kobori, T Iwasaki, N Mushiake and K Honda : Research on exterior deformation monitoring for embankment dams using SAR, International Commission on Large Dams (ICOLD), pp.2365-2375, 2012.
- (2) H Sato, T Sasaki, T Kobori, Y Enomura, Y Yamaguchi, W Sato, N Mushiake, K Honda and N Shimizu : External deformation monitoring of five rockfill dams in the same radar satellite data, ICOLD, 2016. (投稿中)