

■研究開発項目：点検・モニタリング・診断技術の研究開発

■研究開発テーマ：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

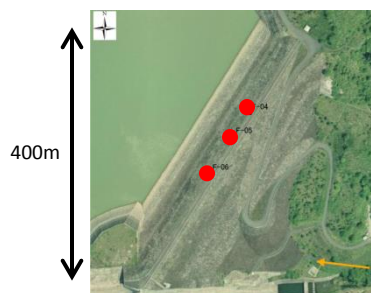
■研究責任者：国土技術政策総合研究所 河川研究部 大規模河川構造物研究室長 金銅将史

研究開発の目的・内容



研究開発の目的

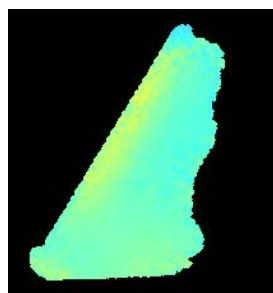
地上のセンサが不要で広域な領域を撮影する衛星SARデータを活用することにより、衛星SARデータに含まれる複数の構造物の変位モニタリングを行い、災害時の早期被害把握や平常時のより詳細で効率的な構造物の変位モニタリングの技術開発を目指すものです。



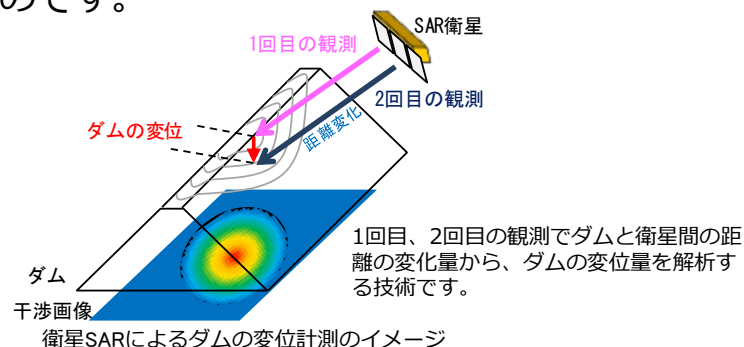
現在の測量点数の例(赤丸で表示)



少ない点から
面全体の評価



衛星SARによる堤体全体の変位計測例



衛星SARによるダムの変位計測のイメージ

研究開発の内容

衛星SARによる変位モニタリング技術の中核技術として、以下の技術開発を進めています。

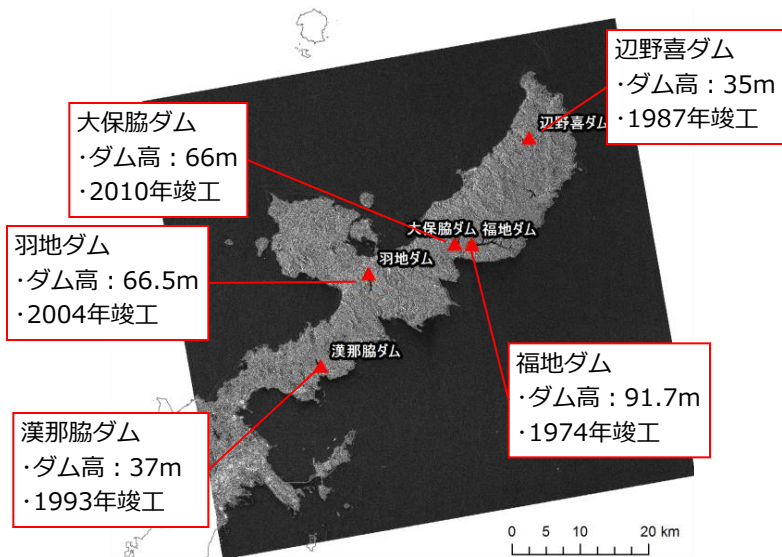
- ①ロックフィルダムへの実用化に向けた技術開発
- ②コンクリートダムや他の構造物にも適用可能な技術開発
- ③SARと、測量やGPS等を組み合わせた信頼性の高いモニタリング技術開発

現状の成果①

【平成26年度検討】

対象ダム：ロックフィルダム5基

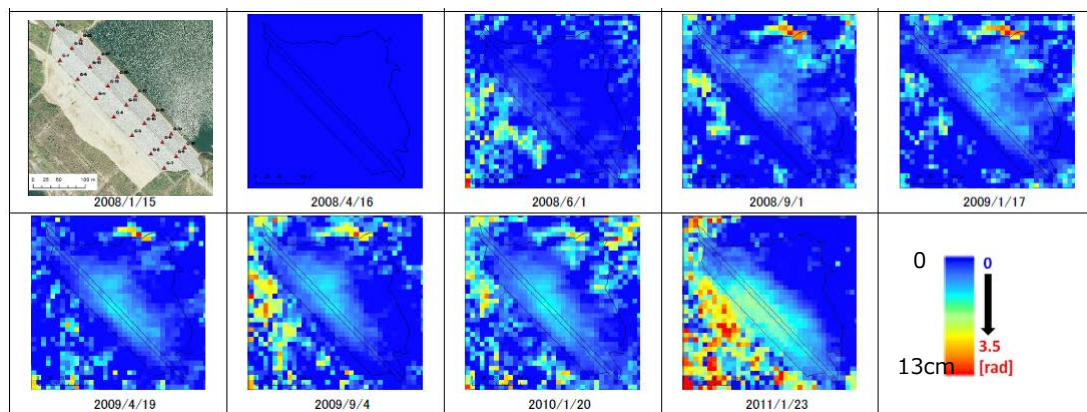
使用したSAR衛星：だいち（空間解像度10m、Lバンド：波長23.6cm）



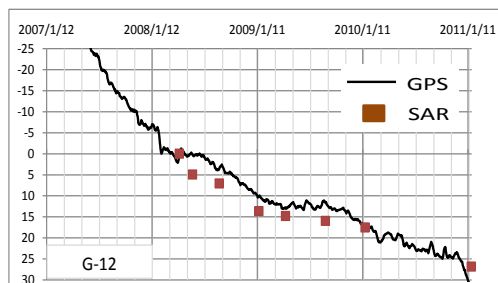
平成26年度検討に使用したSAR画像と対象ダム位置図
(1つの衛星SARデータに含まれる5ダムの変位を解析)

平成26年度検討結果

	平均誤差(RMSE)：単位mm	
	北向軌道	南行軌道
大保脇ダム	6.16	5.95
羽地ダム	4.08	4.75
福地ダム	4.53	4.14
漢那脇ダム	4.41	6.58
辺野喜ダム	5.62	7.90
平均誤差	4.96	5.86



大保脇ダムにおける衛星SARによる変位解析事例
堤体が青→緑→黄に変化(沈下)している様子が捉えられています。
(設計で考慮された沈下の範囲であり、ダムの安全性には影響はありません)



代表点におけるGPSとSARの変位量の比較
非常によく一致しています。

衛星SARによるダムの変位計測結果は、測量やGPSと比較して約5mmの平均誤差と、高い精度の結果が得られました。

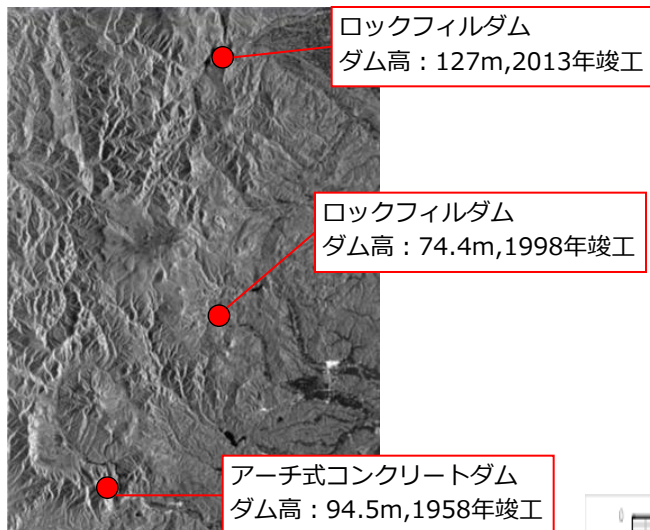
検討対象としたロックフィルダムについては、精度的に実用的であることを確認しました。

得られた成果は土木学会論文集に投稿中です。

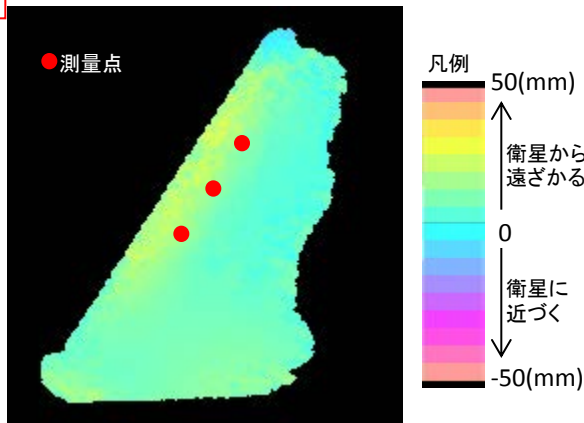
【平成27年度検討】

対象ダム：ロックフィルダム2基、アーチ式コンクリートダム1基

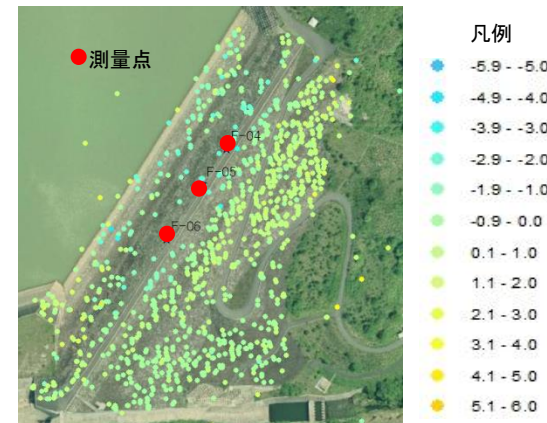
使用したSAR衛星：COSMO-SkyMed（空間解像度3m、Xバンド：波長3.1cm）



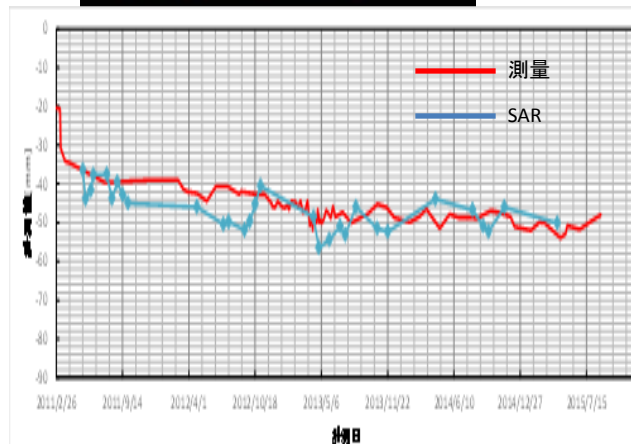
時系列干渉SAR解析（H26年度の検討手法）



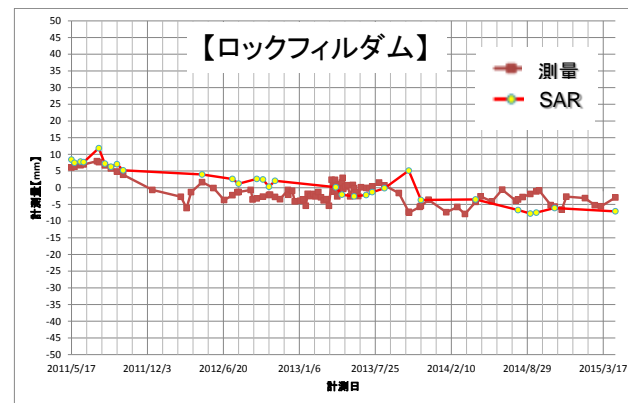
PSInSAR解析（より高度な手法）



平成27年度検討に使用した衛星SAR画像と対象ダム位置
（1つの衛星SARデータに含まれる3ダムの変位を解析）



測量点における測量とSARの誤差（RMSE）：5.2mm
H26年度と同程度の精度が得られました。

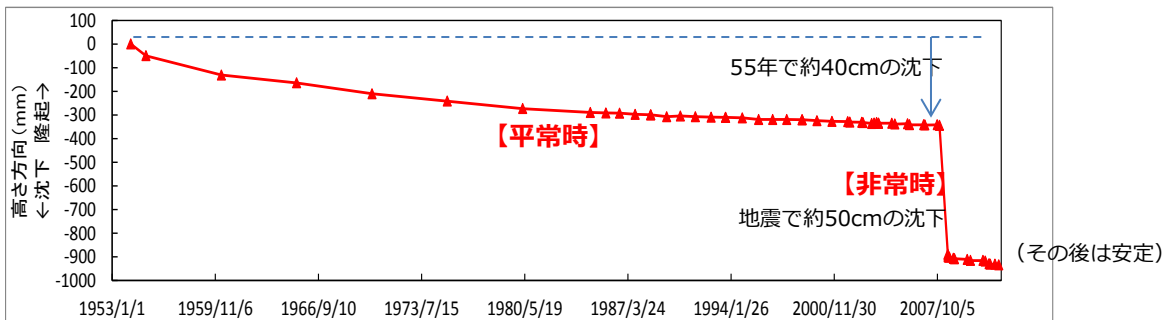


測量点における測量とSARの誤差（RMSE）：3.8mm
さらに高精度な結果が得られました。

- ・時系列干渉SAR解析では、昨年度と同程度の、平均誤差5mmの精度が得られました。
- ・より高精度な手法として、またコンクリートダムへの適用が可能なPSInSAR解析では、平均誤差5mm以内の精度となる結果も得られました。
- ・アーチ式コンクリートダムでは、ダムの年間変位量を考慮した観測波長を選定する必要があることを明らかにしました。

①ロックフィルダムへの実用化に向けた技術開発

- ・ 平常時のゆるやかな変位を計測する技術開発 → 実用化へ
- ・ 非常時の比較的大きな沈下を計測する技術開発 → 地震等による被害のより迅速な把握ができること



ロックフィルダムの沈下量の例
(上図の沈下はダムの安全性には影響はありませんでした)

②コンクリートダムや他の構造物にも適用可能な技術開発

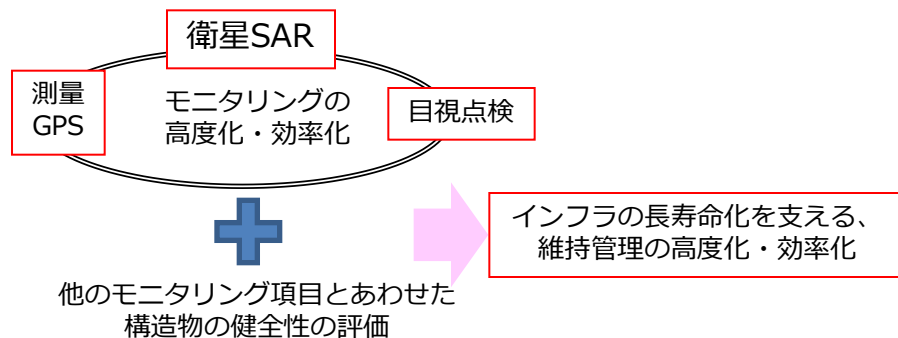
- ・ 平常時の年間変位量も計測可能な技術開発
→ 衛星SARにより各種の構造物をモニタリングできること
- ・ 非常時の挙動をモニタリングする技術開発
→ 地震等による被害のより迅速な把握ができること



アーチ式コンクリートダムの上下流方向の変位量の例
(上図の変位はダムの安全性には影響はありません)

③SARと、測量やGPS等を組み合わせた信頼性の高いモニタリング技術開発

- ・ 衛星SARにより、局所的でわずかな変状の兆候を見逃さないこと
- ・ 測量やGPS等を組み合わせることにより、正常な挙動を異常と評価することが少なく信頼性が高いこと



SIP 維持管理技術のアピールシート

平成 28 年 12 月 2 日

説明会参加者の理解を助けるため、SIP ホームページに公開されている SIP 維持管理技術の情報をもとに、メンテナンスアドバイザー (MA) のコアメンバーが事前に出した意見を記載しました。これに、技術の開発者からコメント (囲み部分) を加えていただきました。

1. 研究開発の技術名称 (研究責任者)

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 (金銅 将史)

2. 技術の特徴

衛星 SAR による変位モニタリング技術を中核技術とし、ロックフィルダム等の災害時の早期被害把握や、平常時のより詳細で効率的な構造物の変位モニタリングを可能とする技術である。

- ① 測量や GPS と比較して平均誤差 約 5mm という高い精度での計測ができる (ロックフィルダムの変位計測結果より)。

【開発者からのコメント】

変位を観測する地上設備が不要、測量に比べ迅速・安価にできる可能性、夜間・雨天時の観測も可能、面的・広域的監視が可能、などの特長があります。

3. 岐阜県内での想定される活用方法

- ① 過去に遡って調べることが出来るという利点を考慮し、危険箇所抽出のスクリーニングに活用する。
- ② 地震時の緊急輸送道路の確保を目的とし、長大法面、高盛土などの地震時に弱点となりうる箇所を抽出し、日常的に変状の兆候がないか監視する。

【開発者からのコメント】

ダムを主な対象に考えているが、斜面のモニタリングなどへの適用も多いに可能性があると考えています。

4. 活用に際しての現状での問題点

- ① 使用する衛星，データ処理の方法など，技術を標準化して使いやすくする必要がある。
- ② 従来は行われていない調査方法であるため，行政にとって導入は「コスト増」と受け取られかねない。
- ③ 観測された変状からこういった対策が妥当であるかの判断規準が明確ではない。

【開発者からのコメント】

- 1 ダムを対象にマニュアル化を予定しています。
- 2 複数施設での同時監視によりコストは下げられると考えています。
- 3 モニタリング手法の研究が主体です。(対策の基準とは別)

5. 活用に向けての課題

- ① この技術で何ができるのか，道路や河川の管理者，防災担当者，消防，警察など幅広い人々に向けた勉強会を開催して，現場のニーズを把握する。
- ② ニーズを集めて，開発者とコンサルタント等の技術者で社会実装の可能性を議論する。
- ③ 新たな調査を追加するための投資に対して，どのようなメリットが得られるのか（ほかの調査のコストを低減できる，これまで必要だけれどできなかった調査が可能になる，等）を明確化する必要がある。

【開発者からのコメント】

- 1 大規模構造物としてのダムへの適用を念頭に管理者ニーズの把握は実施しております。
- 2 実際のダムでの試行を通じて検討中です。
- 3 既存の測量やGPSなどと長所を組み合わせ、短所を補いあうことでトータルとして効率的となる方法を具体的に検討していく予定です。

6. 課題の解決策

- ① 技術の詳細に関するヒアリングの実施
- ② 技術を知ってもらう勉強会の開催
- ③ 実際の構造物でのモニタリング試行

【開発者からのコメント】

- 1,2 ダム管理者への技術の紹介や具体のニーズ把握の調査は実施しています。
- 3 実際のダムでの試行を既に順次拡大してきているところです。

7. これまでに利用されている既存技術

【開発者からのコメント】

フィルダム→通常の測量（光波、水準）が一般的、最近ではGPSも使われている。
コンクリートダム→プラムラインが一般的。

（上記は記入例を示したものであり，開発者のコメントで上書きしてください）

8. 本 SIP 技術の開発状況および開発完了時期

【開発状況】

- ・ロックフィルダムを対象に試行と対象ダム拡大をしているところです。
- ・平成 26・27 年度に実施したロックフィルダムを対象とした検討では、変位の誤差は約 5mm の結果が得られています。
- ・平成 28 年度実施中のロックフィルダムを対象とした検討では、変位の誤差は約 2mm まで高精度化を測ることができています。
- ・コンクリートダムへの適用性を検討しているところです。

【開発完了時期】

H30 年度末を予定しています。(マニュアル化、実際の構造物(ダム)での適用性の確認)

9. 技術の新規性(既存技術との比較)

- ・防災分野で利用が始まっている新たな技術を基に、新たにインフラ(構造物)のモニタリングに活用するものです。
- ・インフラ(構造物)にとっては新しい技術になるかと思います。

10. 技術の適用範囲や精度

- ① 衛星 SAR に対する制限
 - 衛星数が多くはない。
 - 回帰日数が 14 日程度と、観測に制限がある。(リアルタイム性には劣る)
 - 基本的に衛星の視線方向の変位しか計測できない。
- ② 変位の計測精度
 - ロックフィルダムについて→現在、平均的には約 2mm 程度。

(上記は記入例を示したものであり、開発者のコメントで書き添ってください)

11. これまでの実績・成果等

実構造物(ロックフィルダム)を対象として変位計測を実施し、既存の測量・GPS と比較して精度検証を実施している。

→ ロックフィルダム数:平成 26 年度(5 基)、平成 27 年度(2 基)、平成 28 年度(19 基)

(上記は記入例を示したものであり、開発者のコメントで書き添ってください)

12. 実業務での利用時の対応

① 利用時のコスト

衛星データの購入、変位解析の費用が必要です。

衛星データ：無料～100万円程度（1シーン約50km四方）

変位解析：1ダム・1年間の変位計測について約100万円

② 利用者への教育

変位解析については、衛星 SAR についてのある程度の知識が必要です。

最終的なユーザーとしては構造物（ダム等）の管理者を想定していますが、SAR についての知識がなくとも理解できるようなものにしていきたいと考えています。

③ 測定機器のメンテナンス体制

・地上に計測設備は不要なので、データを取得するために管理者が何かメンテナンスを実施する必要ありません。

・人工衛星からのレーダーの反射を利用するので、草刈りを実施するなど、変位の計測精度を向上させるための構造物のメンテナンスは引き続き必要になってくると思います。

④ 利用者側で準備すべき機器等

・衛星 SAR の観測データは必要な時に購入する必要があります。

・人工衛星のデータから変位を算出するための解析は、外注するなどの必要があります。

⑤ 既存技術では不要であったが、本技術では準備すべき事項・対応など

・本技術では、管理者が構造物の変位を求めるために観測を行う必要がなくなります。

・必要な時に衛星 SAR データを購入し、変位を求めるための解析が必要になります。

（上記は記入例を示したものであり、開発者のコメントで上書きしてください）

13. 開発者から特に付記したい項目など

【開発者からのコメント】

・地上に計測設備が不要であり、衛星データがあれば、過去にさかのぼって変位を計測することも可能です。

SIP 維持管理技術へのアドバイスシート整理結果

平成 29 年 1 月 23 日

研究開発の技術名称（研究責任者）

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（金剛 将史）

岐阜大学 SIP 実装プロジェクトの説明会（2016/12/7）における参加者の立場

MA（メンテナンスアドバイザー）：自由に意見を述べ、アドバイスシートに記入する。

6 人

オブザーバー：制約はあるが、意見を述べ、アドバイスシートに記入する。

3 人

聴講者：意見を述べず、アドバイスシートにも記入しない。

記載無：1 人

合計 10 人

以下、MA の回答を（→）で、オブザーバーの回答を（⇒）で表記する。

1. 実業務への適用範囲

- 提案されている技術のみで、実業務に適用できると思う。（4 人）
- 既存技術の一部を補完する要素技術として適用できると思う。（4 人）
- 他の要素技術や既存技術との組合せによって利用の可能性は広がると思う。（1 人）
- その他（）
- 記載無（1 人）

2. 提案技術の利用についての実務面からの印象

- 積極的に利用したいと思う。（4 人）
 - 急に測定対象に選んでも対処が可能である。
 - ロックフィルダムやアースダムの変状について、スクリーニングができるようになる。
- 発注者からの指示であれば利用する。（4 人）
 - 人工構造物および地盤の変位モニタリングによる危険予知・変状検知システムとしての活用が期待できる。
 - ダムの管理手法は国が明確に定めている。
 - ・国は、巨大な構造物で大量の水を貯水しているダムを安全に維持管理するための点検項目を明確に定めている。
 - ・ダムの型式等により計測項目が定められていて、計測方法も既に確立されていることから、既存の計測方法を置き換えることは難しいのではないか。
 - ・平常時の面的な画像データをアーカイブ的に保存し変動時の予測及び変動のプロセス解析に応用する。
- 使えない（使いたくない）と思う。（0 人）
- 記載無（2 人）

3. 提案技術が優れていると思った項目

- 既存技術に比べて、提案技術が優れていると思われる項目、機能等
- ⇒複数ダムの広域的な監視が可能なこと。
 - ⇒経年変位の精度レベルが高い。
 - SAR 計測データを用いた構造物/地盤の変位解析技術。
 - 起点を衛星データが残っている過去に設定できる。
 - ・通常の計測では変動イベント以降からのデータしか蓄積できないが、イベントが発生する前の平常時から計測データを蓄積できること。
 - ・ダムの変動を計測する箇所は、堤体に設置した複数の計測ポイントと限定されている。ポイント以外の変動は検出ができない。説明された手法で面的な変動を検出できるので、変動する箇所と変動しない箇所の位置の可視化により、ひずみが蓄積されている箇所の推定ができる。
 - 自動的に計測されたデータを利用できるようにする点。

4. 提案技術への改良提案

- 岐阜県内での実装に際して、充実させて頂きたい項目、機能等
- 「ダムに入るデータをとってもらっている」ということで、予め点検の対象を明らかにしておかなければいけないようだ。県土全体をゆるく監視するため、という使い方はできないか。
 - 提供できる技術サービスのメニューと費用を提示していただきたい。
 - 計測点で囲んだ区域（橋梁、ダム、河川堤防、危険斜面など）の変形、移動方向などを把握できる機能を開発してほしい。
 - 県が管理中のダム、建設中のダムに応用し「初期値を確保」したい。
 - ・数年前に完成した新しいダムでは初期のデータを得られるのではないか。
 - ・発電施設を最近追加したダムもあり、追加時を初期としたデータをえられるのではないか。
 - ・建設中のダムについては、これから初期状態のデータを得られる。初期値を確保すれば、衛星 SAR による変位計測の導入により経費縮減ができると考えます。
 - 自動解析及び自動抽出のシステムが開発できれば、安全を想定し設定した閾値を超過した範囲をアラームで表示できます。事案の発生前に検知できれば、機動的な次段階の計測の実施、災害発生の予測アナウンスなどを通して、被災の予防若しくは人的被害の軽減が可能になると考えます。
 - 堤防の変位観測に適用できると良い（ニーズも対象数も大きい）。

5. 提案技術の別な用途での利用提案

- 開発意図とは異なる方面での利活用ができると思われる項目等
- 各種構造物、地表面、火山など幅広い対象物の長期変形モニタリング、危険予知システムとして活用できる。
 - 国外への展開：ベトナムを含めたアジアへの展開
 - ・説明者はこの技術を国外に展開することを目的としています。
 - ・SAR の解析で求めた位置を地上と一致させるために GNSS を使用します。日本の準天頂衛

星「みちびき」は、2018年に4基体制にシステムが拡充します。これにより、日本のシステムでアジア諸国に日本の技術で位置情報を提供し、インフラメンテナンス技術の輸出と浸透を図ることができると考えます。

- ・例えば、ベトナム国のインフラは構造物の質が悪く完成直後からビルや橋梁の変形が始まっているといわれています。この衛星による客観的なデータを提示することで第三国に依存している劣悪なインフラ建設を日本の良質な技術の採用に引き戻すことができると考えます。

6. 提案技術と他の新技術との組み合わせの提案

実装に際して他の技術と組み合わせると、更に使いたくなると思うこと等

→記載無

7. 提案技術に対する技術的発展の期待度

本技術提案は、インフラ維持管理・更新・マネジメント技術として、システム化されたインフラマネジメントを構築でき、インフラの事故を未然に防ぎ、維持管理やメンテナンスの負担軽減を図ることが期待できますか。

- 大いに期待できると思う。(3人)

⇒災害時の早期被害把握に有効。

- 改良等を行えば期待できると思う。(5人)

→SAR/GPS計測データと測量データの統合処理と高度化により、構造物、地表面などの高精度長期変形モニタリングシステムとしての発展が期待できる。

→分析する主体が不明：自治体での解析と使用は無理ではないか。その理由は以下の通りです。

①解析手法が専門的：研究者用に開発された衛星技術で一般的でなく、技術者も限定的。別の説明者は、「電離層の見かけ上の速度上昇」+「大気の遅延」の補正と、移動体の移り込みによるエラー排除の手法を説明されました。この手法は非常に高度な内容です。他の技術者で同様な解析ができるでしょうか。

②解析結果の取扱いが難しい：衛星画像解析結果をインフラマネジメントに応用するためには、インフラの管理者が理解できるように「技術成果の翻訳」が必要と思われるが、その翻訳者をどのように求めるのか不明。

- 本日の説明だけでは、期待できないと思う。(0人)

- 記載無(2人)

8. その他（自由な意見を記入してください）

→マニュアルを期待しています。維持管理の高度化、効率化につながります。国交省が積極的に動いてもらえると新技術が活性化すると思います。

→時系列の変化把握に際して、どの程度のマン・マシンパワーで利用できるようになるかがポイントだと思う。

→コンクリートダムの場合は、温度による膨張収縮の影響を排除する必要があるのではないかと。